

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JULIANA ALENCAR FIRMO DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA, COM BASE NA
TEORIA *FUZZY*, PARA O ESTUDO DO RISCO DE EUTROFIZAÇÃO
EM RESERVATÓRIOS COM ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO
ACARAPE DO MEIO DO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA – CEARÁ

2011

JULIANA ALENCAR FIRMO DE ARAÚJO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA, COM BASE NA
TEORIA *FUZZY*, PARA O ESTUDO DO RISCO DE EUTROFIZAÇÃO
EM RESERVATÓRIOS COM ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO
ACARAPE DO MEIO DO ESTADO DO CEARÁ**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Recursos Hídricos, da Universidade Federal do Ceará, como requisito para a obtenção do grau de mestre.

Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Raimundo Oliveira de Souza, Dr.

FORTALEZA – CEARÁ

2011

A689d Araújo, Juliana Alencar Firmo de

Desenvolvimento de uma metodologia, com base na teoria fuzzy, para o estudo do risco de eutrofização em reservatórios com estudo de caso no reservatório Acarape do Meio do Estado do Ceará / Juliana Alencar Firmo de Araújo, 2011.

87 f. ; il.; enc.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2011.

1. Recursos Hídricos. 2. Controle de qualidade da água. I. Souza, Raimundo Oliveira de (orient.). II. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 627

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA, COM BASE NA
TEORIA *FUZZY*, PARA O ESTUDO DO RISCO DE EUTROFIZAÇÃO
EM RESERVATÓRIOS COM ESTUDO DE CASO NO RESERVATÓRIO
ACARAPE DO MEIO DO ESTADO DO CEARÁ**

Esta dissertação foi apresentada como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, a qual encontrar-se-à a disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade. A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovada em 06 de Julho de 2011

Juliana Alencar Firmo de Araújo

Banca Examinadora:

Prof. Raimundo Oliveira de Souza, Dr. - UFC
(Orientador da Dissertação)

Prof. Antônio Idivan Vieira Nunes, Dr. - UFC

Prof.^a Vanda Tereza Costa Malveira, Dr.^a - UNIFOR

À minha mãe, Iany, que me ensinou desde o berço o que é vida, e por ter me feito acreditar que amor é algo aprendido, pois só aprende amar os humanos quando se entende que somos também um.

Ao meu pai, Nelson, que sempre me mostrou que a vida é uma prova de resistência e o fracasso é apenas uma idéia que também deve ser vencida, pois a verdade da vida é vencer, pois vencedores todos somos, apenas pelo fato de termos a vida.

À minha saudosa avó Nelsa, que, com seu exemplo de vida, deixou marcas que repercutem e repercutirão positivamente em minha vida como profissional e como ser humano.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar e acima de tudo, por conduzir o meu caminho de forma tão justa e me dando forças para que eu conseguisse alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, Nelson e Iany, pelo esforço dispensado para me proporcionar uma educação de qualidade, mas, além disso, formação moral e humana. Agradeço pelo estímulo, pelo amor e pelo reconhecimento da importância deste trabalho.

Ao meu namorado e grande amigo, Paulo Roberto, por ter me ensinado tanta coisa, por compartilhar comigo seu amor e amizade, pelo carinho, companhia, dedicação e incentivo nessa fase da minha vida.

Ao orientador e amigo, professor Raimundo Oliveira de Souza, pela orientação segura sem a qual este trabalho não teria sido desenvolvido, pela confiança em mim e pela amizade desenvolvida durante o nosso convívio, que começou na graduação e se estendeu nos anos de mestrado.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, na pessoa do professor Marco Aurélio Holanda de Castro, por toda experiência, ensinamento e atenção.

A todos os professores e funcionários o Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA/UFC), pela contribuição acadêmica, profissionalismo e dedicação.

Aos professores da Banca Examinadora, professor Dr. Raimundo Oliveira de Souza (orientador), professor Dr. Antônio Idivan Vieira Nunes e professora Dr^a Vanda Tereza Costa Malveira, pelas importantes contribuições sugeridas para o engrandecimento deste trabalho.

À professora Dr^a Irla Vanessa Andrade de Sousa Ribeiro por informações e dados cedidos necessários para evolução deste trabalho e à aluna de doutorado Vanessa Ueta Gomes (DEHA/UFC), pela ajuda no desenrolar do programa computacional.

Aos colegas de turma de mestrado, em especial a Raquel Jucá, pelo desprendimento em compartilhar seus conhecimentos e pela amizade recebida.

À Universidade Federal do Ceará, juntamente com o governo, por proporcionar uma ótima oportunidade de estudar e contribuir para o desenvolvimento da ciência.

À Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), nas pessoas de Walt Disney Paulino e Flávio Ferreira, pelas informações prestadas e pelos dados disponibilizados indispensáveis à execução do trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro com a manutenção de bolsa de auxílio.

Finalmente, desejo agradecer a todos que, direta ou indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho e que, involuntariamente, deixei aqui de mencionar nomes.

RESUMO

Os processos de eutrofização em reservatórios constituem-se como um dos mais importantes problemas de qualidade de água a ser estudado por engenheiros, cientistas e gestores de recursos hídricos. Como se sabe, em regiões de escassez, o armazenamento de água é de fundamental importância para o desenvolvimento sustentável, tanto do ponto de vista econômico, como do ponto de vista social. Assim, adquirir conhecimento que explique os principais fatores nos processos de eutrofização é um desafio. Este trabalho tem como objetivo fundamental, o desenvolvimento de uma metodologia capaz de estudar o risco de eutrofização de um reservatório, com base na Teoria *Fuzzy* e nos mecanismos usados para a determinação dos Índices do Estado Trófico Modificado (IET_M). Para tal, foram usados dados do Reservatório Acarape do Meio, no estado do Ceará, notadamente, nos anos de 2001 até 2006, sendo que no ano de 2003 não houve visita ao campo por parte da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH. Para o cálculo do risco foram usadas funções de pertinência do Índice de Estado Trófico Modificado, transformadas segundo as regras dos Números Difusos. Os resultados mostram que para os anos observados, somente em 2006 a qualidade das águas daquele reservatório ficou em estado crítico.

Palavras-chave: Eutrofização. Índice de Estado Trófico Modificado. Risco *Fuzzy*.

ABSTRACT

The processes of eutrophication in reservoirs become as an important problem in water quality to be studied by engineers, scientists and water managers. As it is known, in areas of scarcity, water storage is of fundamental importance to sustainable development, both from an economic standpoint, as the social point of view. Thus, acquiring knowledge that explains the main factors in eutrophication processes is a challenge. This work has as fundamental goal, the development of a methodology capable of studying the risk of eutrophication in a reservoir, based on Fuzzy Theory and the mechanisms used for the determination of the Modified Trophic State Index. In such way, it was used data from the Acarape do Meio Reservoir, in the State of Ceará, especially in the years 2001 to 2006, but in 2003 there were not field visits by the Company of Water Resources Management - COGERH. To calculate the risk it was used membership functions of the Modified Trophic State Index, transformed according to the rules of Fuzzy Numbers. The results show that for the years of observation, only in 2006 the reservoir water quality was in critical condition.

Keywords: Eutrophication. Modified Trophic State Index. Fuzzy Risk.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Eutrofização em um corpo hídrico.....	23
FIGURA 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta.....	45
FIGURA 3.2 – Açude Acarape do Meio (Açude Eugene Gudim) localizado no centro. As cidades de Palmácia e Pacoti a montante e Redenção a jusante.....	46
FIGURA 3.3 – Vista aérea do Açude Acarape do Meio.....	47
FIGURA 3.4 – Função de pertinência para concentração.....	48
FIGURA 3.5 – Localização das coordenadas dos pontos de coleta do Açude Acarape do Meio.....	49
FIGURA 3.6 – Batimetria do Açude Acarape do Meio.....	51
FIGURA 3.7 – Entrada no ponto 1 (local Genipapo). A montante, criação de animais (porco e gado) e presença de roçado (arroz, milho e feijão).....	51
FIGURA 3.8 – Entrada no ponto 2 que vêm do Rio Pacoti. Presença de macrófitas aquáticas, criação de animais à direita e plantação de bananeira à esquerda.....	52
FIGURA 3.9 – Saída a jusante da barragem do Açude Acarape do Meio.....	52
FIGURA 3.10- Saída da adutora a jusante da barragem do Açude Acarape do Meio (esquerda). Saída d'água para curso natural do Rio Pacoti à jusante (direita).....	53
FIGURA 3.11 – Açude Acarape do Meio - Ponto 9, próximo a barragem no dia 24/04/2006....	53
FIGURA 3.12 – Função de pertinência para IET.....	56
FIGURA 3.13 – Representação gráfica do risco e da garantia.....	58
FIGURA 3.14 – Esquema utilizado para o cálculo do risco.....	59
FIGURA 4.1 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2001.....	60
FIGURA 4.2 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto do ano de 2001. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.....	61
FIGURA 4.3 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de setembro do ano de 2001. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.....	63
FIGURA 4.4 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de novembro do ano de 2001. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.....	64
FIGURA 4.5 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio em fevereiro de 2002.....	65
FIGURA 4.6 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2002.....	66

FIGURA 4.7 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de junho de 2002.....	66
FIGURA 4.8 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto de 2002.....	67
FIGURA 4.9 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de outubro do ano de 2002. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.....	68
FIGURA 4.10 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio em novembro de 2002.....	69
FIGURA 4.11 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio em dezembro de 2002.....	70
FIGURA 4.12 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de novembro do ano de 2004. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.....	71
FIGURA 4.13 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de dezembro do ano de 2004. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.....	72
FIGURA 4.14 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de março do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.....	73
FIGURA 4.15 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.....	75
FIGURA 4.16 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de julho do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.....	76
FIGURA 4.17 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio em setembro de 2005...	77
FIGURA 4.18 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio do ano de 2006. (A) Risco de Eutrofia (B) Risco de Hipereutrofia.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Relação entre níveis tróficos e as características dos lagos.....	29
TABELA 2	Critérios de Estado Trófico para o Índice de Carlson.....	30
TABELA 3	Classificação do Estado Trófico segundo o Índice de Carlson Modificado.....	31
TABELA 4	Localização dos pontos de coleta no açude Acarape do Meio no município de Redenção e batimetria (cotas).....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

\tilde{F}	Conjunto <i>Fuzzy</i>
Ω	Conjunto Universo
ω	Elemento do Conjunto <i>Fuzzy</i>
$\mu_{\tilde{F}}$	Função de Pertinência do Conjunto <i>Fuzzy</i>
\in	Pertence
\tilde{A}	Conjunto <i>Fuzzy</i>
\cup	União
\tilde{B}	Conjunto <i>Fuzzy</i>
\cap	Intersecção
\forall	Para todo
\subseteq	Está contido
\tilde{A}_c	Complemento de um Conjunto <i>Fuzzy</i>
\emptyset	Conjunto vazio
h	Nível de corte no Conjunto <i>Fuzzy</i>
\geq	Maior ou igual que
$<$	Menor que
\tilde{X}	Conjunto <i>Fuzzy</i>
\mathbb{R}	Conjuntos dos Números Reais
x	Elemento do Conjunto <i>Fuzzy</i>
\leq	Menor ou igual que
$>$	Maior que
\bar{A}	Par ordenado de um intervalo
\oplus	Soma
\tilde{C}	Conjunto <i>Fuzzy</i>
\ominus	Subtração
\otimes	Multiplicação
\oslash	Divisão
\tilde{R}	Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma

\tilde{L}	Função de pertinência para a carga de concentração medida
\tilde{M}	Função marginal de segurança
$R(h)$	Resistência no nível h
$R_1(h)$	Resistência no limite esquerdo no nível h
$R_2(h)$	Resistência no limite direito no nível h
$L(h)$	Carga no nível h
$L_1(h)$	Carga no limite esquerdo no nível h
$L_2(h)$	Carga no limite direito no nível h
$M(h)$	Margem de segurança no nível h
∞	Infinito
m	Números <i>Fuzzy</i> da função marginal de segurança
\widetilde{IET}_M	Função de pertinência do IET_M
\widetilde{PT}	Função de pertinência para concentração de fósforo total
\widetilde{CLA}	Função de pertinência para concentração de clorofila-a
\widetilde{OS}	Função de pertinência para concentração de ortofosfato solúvel
\tilde{L}	Função de pertinência para a carga de concentração medida
L_L	Limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero)
L_M	Valor da carga com grau de pertinência 1 (um)
L_U	Limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero)
\tilde{R}	Função de pertinência para a resistência estabelecida por norma
R_L	Limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero)
R_M	Valor da resistência com grau de pertinência 1 (um)
R_U	Limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CAPES	Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de São Paulo
CL_A	Concentrações de Clorofila-a
COGERH	Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
ETA's	Estações de Tratamento de Água
GF	Garantia <i>Fuzzy</i>
IET	Índice de Estado Trófico
IET _M	Índice de Estado Trófico Modificado
OECD	Organization for Economic Co-Operation and Development
OS	Concentrações de Ortofosfato Solúvel
PT	Concentrações de Fósforo Total
RF	Risco <i>Fuzzy</i>
SIF	Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>
SRH-CE	Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
UFC	Universidade Federal do Ceará
UNIFOR	Universidade de Fortaleza
US-EPA	United States Environmental Protection Agency
US-EPA/NES	United States Environmental Protection Agency/National Eutrophication Index
UTM	Sistema Universal Transverso de Mercator

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	09
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
1.2 Organização do Trabalho.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Dinâmica dos Reservatórios.....	21
2.2 Eutrofização.....	23
2.2.1 Problemas de Eutrofização.....	25
2.2.2 Controle da Eutrofização.....	25
2.3 Determinação dos Indicadores Tróficos.....	26
2.3.1 Fósforo Total.....	27
2.3.2 Ortofosfato Solúvel.....	28
2.3.3 Clorofila-a.....	28
2.4 Índices de Estado Trófico.....	28
2.5 Índices de Estado Trófico Modificado.....	31
2.6 Correlação entre as Correlações de Fósforo e Clorofila-a.....	32
2.7 Lógica <i>Fuzzy</i>.....	32
2.8 Conjuntos Difusos.....	34
2.9 Conjuntos Nível h, Cnjuntos <i>Fuzzy</i> Normal e Convexo.....	35

2.10	Números <i>Fuzzy</i>	36
2.11	Representação L-R de um Número <i>Fuzzy</i>	36
2.12	Número <i>Fuzzy</i> Triangular	37
2.13	Operações Aritméticas em Intervalos	37
2.13.1	Adição.....	37
2.13.2	Subtração.....	38
2.13.3	Multiplicação.....	39
2.13.4	Divisão.....	40
2.14	Riscos e Incertezas	40
2.14.1	Risco.....	41
2.14.2	Análise de Riscos.....	41
2.14.3	Avaliação de Riscos.....	42
2.14.4	Análise de Riscos x Avaliação de Riscos.....	42
2.14.5	Risco e Garantia <i>Fuzzy</i>	43
3	METODOLOGIA	45
3.1	Caracterização do Açude Acarape do Meio	46
3.2	Obtenção de dados e localização dos pontos de coleta	48
3.3	Indicadores de qualidade	54
3.4	<i>Fuzzificação</i> dos Índices de Estado Trófico Modificado	55
3.5	Cálculo do Risco	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
5.1	Conclusões	80
5.2	Recomendações	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

Um dos mais sérios problemas que está sendo enfrentado pelos gestores de recursos hídricos, em regiões semi-áridas, diz respeito aos aspectos da qualidade de água em reservatório. Como se sabe, com o crescimento populacional e as transformações climáticas que vem ocorrendo em escala global, a necessidade de armazenamento de água em reservatórios artificiais se intensificou. Por outro lado, diferentes de rios, os reservatórios estão sujeitos a diversos processos físicos, químicos e biológicos, que causam severas transformações nos aspectos da qualidade da água dos mesmos.

Um dos mais importantes fenômenos que se desenvolve nos reservatórios e que é determinante na sua qualidade de água é a eutrofização. Sua formação é decorrente de um processo natural que ocorre em todos lagos e reservatórios, ou através da presença de uma intervenção humana, aumentando o fluxo de nutrientes para o corpo hídrico, acelerando, assim, este processo. Sua característica principal é o crescimento exagerado de organismos aquáticos autotróficos, particularmente algas planctônicas e ervas aquáticas.

Uma das formas mais comuns de desenvolver estudos de qualidade de água em reservatórios é através de modelagem matemática. Esta técnica, que tem crescido intensamente nos últimos anos em decorrência dos avanços computacionais, permite que cada processo físico, químico ou biológico possa ser representado através de equações matemáticas.

Por outro lado, a presença de componentes físicos, químicos e biológicos nas águas de um reservatório, associado com as baixas velocidades, presentes nestes ecossistemas, permite a existência de processos extremamente complexos, cuja descrição, através de modelos matemáticos torna-se uma missão desafiadora. Isto implica a necessidade de se estabelecer um conjunto de simplificações criteriosas, de modo a se ter resultados que venham descrever esses processos com algum grau de realismo.

Do ponto de vista de modelagem há dois tipos de modelos que merecem destaques. O primeiro é formado por equações de natureza determinísticas, onde cada parâmetro é um número. O segundo, formado por equações estocásticas, tem seus parâmetros normalmente formados por distribuições. Um exemplo para este tipo de modelo são os modelos

probabilísticos que, normalmente, têm para seus parâmetros algumas distribuições presentes nos estudos de estatística. Estes modelos necessitam de um excepcional banco de dados para que seus resultados sejam confiáveis.

Para contornar estes inconvenientes, algumas pesquisas têm lançado mão de uma metodologia com base na Teoria *Fuzzy*. Esta Teoria, que se fundamenta na representação matemática de alguns parâmetros, na forma de funções de pertinência, tem a vantagem de permitir uma avaliação das incertezas em qualquer processo físico, sem a necessidade de uma base de dados tão consistente. Atualmente, a Teoria *Fuzzy* tem sido usada nos vários campos da ciência, principalmente na Engenharia Elétrica, apresentando resultados satisfatórios.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia, fundamentada em uma combinação entre as formulações dos Índices de Estado Trófico Modificado (IET_M) e a Teoria *Fuzzy*, para determinar o risco de eutrofização no Reservatório Acarape do Meio, no Estado do Ceará. A metodologia proposta permite que haja uma transformação desses índices em funções de pertinência e, com isso, uma avaliação do risco de eutrofização possa ser realizada.

Os resultados mostraram que esta metodologia, bem aplicada, pode ser uma alternativa concreta na avaliação dos campos de risco, para diferentes regiões de um reservatório, e para diferentes tempos, permitindo, assim, um controle mais apropriado nas Gestões dos Recursos Hídricos.

1.1 Objetivos da Pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar os aspectos de qualidade de água no Reservatório Acarape do Meio, pertencente à Bacia Metropolitana de Fortaleza, mediante a aplicação da Teoria *Fuzzy*, tentando identificar as tendências de seu estado trófico, mediante a *fuzzificação* do índice de estado trófico modificado proposto pela Companhia de Tecnologia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar uma base de dados dos principais parâmetros relacionados com a qualidade de água, referentes ao reservatório em questão;
- Estabelecer funções de pertinência para os principais indicadores que compõem o Índice de Estado Trófico (*IET*) de um reservatório;
- Aplicar uma metodologia *Fuzzy* para o cálculo de Índices de Estado Trófico Modificado e classificar o estado trófico do reservatório em função deste índice;
- Avaliar, a partir da metodologia desenvolvida, o risco de eutrofização, mostrando, assim, um diagnóstico da capacidade do reservatório em estudo.

1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação foi organizada em cinco capítulos. O capítulo 1 descreve sua introdução, os objetivos da pesquisa e trata de como o documento foi organizado.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho. Nele se encontram os principais fundamentos da teoria *fuzzy* e da teoria sobre os indicadores que medem os aspectos da qualidade de água nos reservatórios.

O capítulo 3 mostra as fases a serem seguidas no desenvolvimento da metodologia; as formulações e metodologia de cálculo para o Índice de Estado Trófico Modificado, e sua transformação em funções de pertinências. Neste capítulo também é mostrado os métodos para o cálculo do risco em cada ponto do reservatório.

O capítulo 4 apresenta uma análise dos resultados, estabelecendo uma sistemática de apresentação que se inicia com os resultados para diferentes estações do ano, bem como, para diferentes pontos do reservatório.

E, finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões desta pesquisa e faz algumas recomendações sobre estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dinâmica dos Reservatórios

O entendimento da dinâmica dos reservatórios tem se destacado como um grande desafio para engenheiros e cientistas, na busca de encontrar soluções que minimizem os impactos causados pelos mais variados tipos de usos dos recursos hídricos.

Entender o funcionamento de lagos e reservatórios significa entender o comportamento de suas atividades físicas, químicas e biológicas, bem como, compreender os processos que governam o desenvolvimento dessas atividades, de modo a permitir a avaliação precisa nos parâmetros que determinam os aspectos da qualidade da água dos mesmos.

Os estudos que têm sido realizados, referentes aos diversos fenômenos que ocorrem em reservatórios, como também, referentes aos problemas de qualidade de água a eles associados, têm permitido diagnosticar a grande dificuldade existente em avaliar suas inter-relações.

Reservatórios são ecossistemas lacustres especiais, nos quais as características físicas, químicas e biológicas são fortemente condicionadas pelas flutuações do nível d'água causadas por periódicas, geralmente sazonais, recargas naturais e pelas abstrações antropogênicas relativamente constantes. Estes movimentos das massas d'água são processos dinâmicos e, portanto, estes ecossistemas nunca estão em regime estacionário (WETZEL, 1993; GERALDES & BOAVIDA, 1999).

A diferença mais marcante entre lagos e reservatórios é a controlabilidade das vazões defluentes destes últimos, podendo, no caso de se destinarem ao abastecimento d'água para consumo humano ou à geração de energia, ter seu nível d'água alterado de tal forma que as mudanças na configuração das margens, resultantes desta flutuação, podem causar severos impactos aos *habitats* aquáticos. Outra característica bem peculiar dos reservatórios é que as vazões defluentes podem ser originadas a partir da tomada d'água em várias profundidades, mais comumente nas maiores, podendo resultar, em alguns casos, em sérios problemas de qualidade de água nos sistemas lóticos a jusante (BRANCO, 1991).

Os fitoplânctons, normalmente presentes na água, dependem dos nutrientes e da luz solar para sua sobrevivência. Quando se introduzem elevadas quantidades de nutrientes em um reservatório de água, oriundo de esgotos domésticos, industriais ou de fertilizantes, há um crescimento das populações de algas e de outras plantas, o que pode resultar na proliferação excessiva de algas causando: sabor e odor, toxidez, turbidez e cor, massa de matéria orgânica, cuja decomposição resulta na redução do oxigênio dissolvido da água com impactos sobre a vida aquática, aderência às paredes dos reservatórios e tubulações (lodo), corrosão, prejuízos ao tratamento da água (MOTA, 1997).

Apesar das similaridades na dinâmica de corpos d'água com características hidráulicas semelhantes, cada corpo d'água apresenta respostas específicas aos mais variados fatores, o que tem estreita relação com a região climática e geológica em que se encontra (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI, 1995).

A radiação solar exerce uma influência marcante sobre o metabolismo das comunidades aquáticas, notadamente com relação ao processo fotossintético realizado pelas algas. A par desta influência biológica, a radiação solar também afeta a temperatura das camadas superficiais do corpo de água, influenciando assim na configuração das fases de estratificação e de circulação do reservatório. O padrão de circulação vertical da represa condiciona a distribuição de compostos particulados e dissolvidos e define a capacidade de oxigenação da massa líquida. Como consequência do recebimento de uma radiação solar mais intensa, os ambientes aquáticos tropicais apresentam certas peculiaridades em comparação com os sistemas de clima temperado, quais sejam (VON SPERLING & DANTAS, 2000): maior assimilação de nutrientes, principalmente o nitrogênio e o fósforo pelas algas; menor frequência de picos de densidades de algas, pois a produção primária é intensa em todo o ano; elevadas taxas de reciclagem de materiais e baixas concentrações de nutrientes na massa líquida, devido ao fato destes estarem mais fortemente presentes na biomassa das algas.

A profundidade de um reservatório tem grande importância no padrão de circulação e na distribuição de organismos e compostos químicos na coluna de água. Pequenas profundidades conduzem a reservatórios com maior produtividade primária. Ambientes com profundidades máximas, acima de 10 m, são classificados como profundos (VOLLENWEIDER & KERERES, 1981; VON SPERLING, 1999).

Os reservatórios do Estado do Ceará, especificamente os localizados nos domínios das bacias metropolitanas, além de sofrerem os impactos causados pela própria natureza do regime climático, caracterizado pela irregularidade das precipitações no tempo e no espaço, alto poder evaporante e altas taxas de insolação durante a maior parte do ano, contribuindo decisivamente para o processo de salinização gradual, vêm sofrendo com os impactos resultantes das diversas atividades desenvolvidas ao longo de suas bacias hidrográficas, além daqueles decorrentes do uso e ocupação do solo destas áreas sem planejamento prévio (FREIRE, 2000).

2.2 Eutrofização

A eutrofização das águas interiores é considerada um dos maiores problemas ambientais, em nível mundial. Ela causa grandes impactos negativos, ecológicos, de saúde e economia, mediante a deteriorização de um recurso primário e finito: a água. Água doce limpa é essencial para diversos organismos e para a sociedade humana; logo, água de má qualidade ameaça a existência humana.

Os sintomas da eutrofização incluem espumas de algas e toxinas derivadas de seu florescimento, grandes infestações de algumas plantas aquáticas, maior incidência de doenças hidricamente transmissíveis, águas turvas, odores fétidos, água com mau paladar, depleção de oxigênio dissolvido e mortandade de peixes.



Figura 2.1 – Eutrofização em um corpo hídrico

O perigo do fenômeno da eutrofização deve-se ao fato de que o mesmo é seguido pela transformação profunda do ecossistema aquático do reservatório, provocando conseqüências negativas no que diz respeito à qualidade da água para abastecimento urbano e irrigação. Alguns componentes do fitoplâncton, cuja importância no estabelecimento do balanço ecológico dos ecossistemas aquáticos é considerada como principal, podem afetar potencialmente a qualidade sanitária das águas, seja pela produção do odor e gosto desagradável ou de substâncias tóxicas a outros organismos, inclusive aos seres humanos (ROCHA, 1992). Portanto, os mananciais eutrofizados em muitos casos criam grandes problemas na área de abastecimento urbano (BERNHARDT, 1995).

A eutrofização artificial das águas continentais está relacionada com o aumento da população, da industrialização, do uso de fertilizantes químicos na agricultura e com a produção, desde 1945, de produtos de limpeza contendo compostos polifosfatados. Todos estes fatores resultam na liberação de nutrientes, como fosfato e nitrogênio, que são compostos estimuladores da eutrofização. A importância destes elementos como desencadeadores do processo de eutrofização resulta de sua atuação como fatores limitantes na produção primária de ecossistemas, por estarem relacionados com o processo fotossintético (ESTEVES, 1988).

Um dos maiores problemas do estudo de eutrofização é a determinação do elemento limitante. Oxigênio, carbono, nitrogênio, fósforo são necessários para as algas em maior quantidade. A utilização de um nutriente por um organismo, em geral, obedece à “Lei do Mínimo” estabelecida por Liebig (ODUM, 1971), onde o crescimento de um organismo é limitado pela substância disponível nas quantidades mínimas relativas às suas necessidades para crescimento e reprodução. Na maioria dos sistemas aquáticos, inclusive os mesmos da zona tropical, é o fósforo ou, em casos menos freqüentes, o nitrogênio o nutriente limitante. Isso confirma-se pela existência da relação nítida entre concentração do fósforo e características da produtividade dos ambientes aquáticos. Há duas causas principais que determinam o domínio do fósforo como nutriente principal: a primeira é que o fluxo antropogênico do fósforo na biosfera aumenta mais rápido do que o nitrogênio; a segunda é que as espécies de algas, no caso extremo, podem capturar o nitrogênio da atmosfera para se alimentar.

2.2.1 Problemas da Eutrofização

São os seguintes os principais efeitos indesejáveis da eutrofização (THOMANN & MUELLER, 1987):

- Problemas estéticos e recreacionais;
- Condições anaeróbias no fundo do corpo d'água;
- Eventuais condições anaeróbias no corpo d'água como um todo;
- Eventuais mortandades de peixes;
- Maior dificuldade e elevação nos custos de tratamento da água;
- Problemas com o abastecimento de águas industriais;
- Toxicidade das algas;
- Modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial;
- Redução na navegação e capacidade de transporte;
- Desaparecimento gradual do lago como um todo.

2.2.2 Controle da Eutrofização

As estratégias de controle usualmente adotadas podem ser classificadas em duas categorias amplas (THOMANN & MUELLER, 1987; VON SPERLING, 1995): medidas preventivas e medidas corretivas.

As medidas preventivas compreendem a redução do aporte de fósforo através de atuação nas fontes externas podendo incluir estratégias relacionadas ao controle dos esgotos com o tratamento dos esgotos a nível terciário com remoção de nutrientes; tratamento convencional dos esgotos e lançamento a jusante da represa; exportação dos esgotos para outra bacia hidrográfica que não possua lagos ou represas; e, infiltração dos esgotos no terreno, ou ao controle da drenagem pluvial com o controle do uso e ocupação do solo na bacia, faixa verde ao longo da represa e tributários e construção de barragens de contenção.

Já as medidas corretivas incluem uma ou mais das seguintes estratégias: processos mecânicos como: aeração, desestratificação, aeração do hipolímnio, remoção dos sedimentos, cobertura dos sedimentos, retirada de águas profundas, remoção de algas, remoção de macrófitas e sombreamento; processos químicos, como: precipitação de nutrientes, uso de algicidas, oxidação do sedimento com nitratos e neutralização; e, processos biológicos, como: biomanipulação, uso de cianófagos e uso de peixes herbívoros.

Sempre que possível, deve-se dar ênfase aos métodos preventivos, usualmente mais baratos e eficazes.

2.3 Determinação de Indicadores Tróficos

Em várias abordagens para o estabelecimento do sistema de classificação do estado trófico, os valores de determinados parâmetros de qualidade de água medidos (por exemplo: fósforo total, clorofila, etc) têm sido utilizados como indicador trófico. Idealmente, os valores de qualidade da água observados podem ser comparados aos sistemas de classificação estabelecidos para determinar o estado trófico de qualquer corpo d'água em particular (USEPA, 1999).

Os indicadores tróficos aplicados na maioria dos sistemas de classificação trófica são: clorofila-a, fósforo total, nitrogênio total, profundidade *Secchi* e porcentagem de saturação de oxigênio hipolimnético (NOVOTNY & OLEM, 1994; CHAPRA, 1997 ; VOLLENWEIDER & KEREKES, 1980; USEPA, 1999).

Em águas interiores, como lagos e reservatórios, normalmente o fósforo é o nutriente limitante ao invés do nitrogênio, pois as algas azuis-verdes podem "fixar" o nitrogênio elementar da água como uma fonte de nutriente (USEPA, 1999). Portanto, tendo em vista a limitação acima citada, nesse estudo foi omitido o nitrogênio total da análise e três indicadores incluindo fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a foram considerados no processo de avaliação do sistema.

2.3.1 Fósforo Total

O fósforo aparece em águas naturais por causa, principalmente, das descargas de esgotos sanitários. Nestes, os detergentes superfosfatados empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte, além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas. Alguns efluentes industriais, como os de indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios apresentam fósforo em quantidades excessivas. As águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais (CETESB, 2002 apud ANA, 2005).

O fósforo pode se apresentar nas águas sob três formas diferentes. Os fosfatos orgânicos são a forma em que o fósforo compõe moléculas orgânicas, como a de um detergente, por exemplo. Os ortofosfatos, por outro lado, são representados pelos radicais, que se combinam com cátions formando sais inorgânicos nas águas. Os polifosfatos ou fosfatos condensados são polímeros de ortofosfatos. No entanto, essa terceira forma não é muito importante nos estudos de controle de qualidade das águas, porque os polifosfatos sofrem hidrólise, convertendo-se rapidamente em ortofosfatos nas águas naturais.

Assim como o nitrogênio, o fósforo constitui-se em um dos principais nutrientes para os processos biológicos, ou seja, é um dos chamados macronutrientes por ser exigido também em grandes quantidades pelas células. Por ser nutriente para processos biológicos, o excesso de fósforo em esgotos sanitários e fluentes industriais conduz a processos de eutrofização das águas naturais (CETESB, 2002 apud ANA, 2005).

De acordo com Tundisi (2001), o aumento da taxa de fotossíntese, devido ao maior crescimento das plantas por causa da grande concentração de fósforo, pode aumentar a invasão de dióxido de carbono proveniente da atmosfera. O enriquecimento com o fósforo pode reduzir a relação entre o nitrogênio e o fósforo, podendo favorecer o crescimento de cianobactéria fixadora de nitrogênio. Grandes volumes de biomassa de plantas geradas pelo enriquecimento com fósforo podem ter maior taxa de respiração e desenvolver águas podres, ou anóxica, em grandes áreas do reservatório.

2.3.2 Ortofosfato Solúvel

Os ortofosfatos são biodisponíveis e uma vez assimilados, são convertidos em fosfato orgânico e em fosfatos condensados. Após a morte de um organismo, os fosfatos condensados são liberados na água; entretanto, não estão disponíveis para absorção biológica até que sejam hidrolizados por bactérias para ortofosfatos.

2.3.3 Clorofila-a

A clorofila é um dos pigmentos, além dos carotenóides e ficobilinas, responsáveis pelo processo fotossintético. A clorofila-a é a mais universal das clorofilas (*a*, *b*, *c*, e *d*) e representa, aproximadamente, de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas e é, por isso, um indicador da biomassa algal. Assim, a clorofila-a é considerada a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos.

2.4 Índices de Estado Trófico (IET's)

O estado trófico de um corpo d'água pode ser expresso como a condição nutricional do mesmo, e nenhum simples indicador trófico ou parâmetro é completamente adequado para descrever e/ou quantificar este conceito. Apesar disto, alguns autores classificam os lagos em função de parâmetros que refletem a produtividade do corpo de água, ou seja, floração de algas, presença de macrófitas, oxigênio dissolvido etc. (VOLLENWEIDER, 1983; RAST & LEE, 1978).

De forma geral, são três os estados tróficos da água: oligotrófico (lagos claros e baixa produtividade); mesotrófico (lagos com produtividade intermediária) e eutrófico (lagos com elevada produtividade, comparado ao nível natural básico). Entende-se por produtividade de um corpo d'água a sua capacidade de propiciar e sustentar o desenvolvimento da vida (TOLEDO et al., 1984).

Foi analisada a aplicação da classificação de estados tróficos em lagos e as implicações quanto à utilização destes parâmetros de qualidade de água para o gerenciamento de reservatórios (LIND et al., 1993). Os métodos testados e classificados em termos de aproximações, superestimativas ou de subestimativas do estado trófico foram os seguintes: concentrações de fósforo e nitrogênio e resposta ao nível de suprimento; índices de estado trófico ou de aportes (SAKAMOTO, 1966; VOLLENWEIDER, 1968; US-EPA/NES, 1974; CARLSON, 1977), produção de fitoplâncton (WETZEL, 1975), concentração de clorofila-a (SAKAMOTO, 1966), transparência da água (US-EPA, 1974) e composição do fitoplâncton (NYGARD, 1949; STOCKNER, 1971). Dos resultados foi concluído que a classificação de estados tróficos em reservatórios é muito mais difícil do que em lagos, em função do binômio barragem/rio influenciar muito na transparência da água e também pela influência marcante do tempo de residência nas respostas ao aporte de nutrientes, o que pode invadir a utilização de algumas das classificações (Tabela 1).

Tabela 1 – Relação entre níveis tróficos e as características dos lagos e reservatórios

Estado Trófico	Matéria Orgânica (mg/m³)	Fósforo Total (mg/m³)	Clorofila (mg/m³)	Profundidade de Secchi (m)
Oligotrófico	Baixo	8,0	4,2	9,9
Mesotrófico	Médio	26,7	16,1	4,2
Eutrófico	Alto	84,4	42,6	2,45
Hipereutrófico	Muito Alto	750 - 1200	-	0,4 - 0,5

Fonte: VOLLENWEIDER & KEREKES (1981)

As características amplamente usadas nas avaliações de estado trófico dos reservatórios são: clorofila-a, concentração de fósforo total, nitrogênio total ou inorgânico, transparência da água pelo disco de *Secchi*, consumo de oxigênio dissolvido no hipolímnio e a área ocupada pelas macrófitas aquáticas (VOLLENWEIDER, 1968; US-EPA, 1974; CHAPRA & TARAPCHAK, 1976; OECD, 1982).

A caracterização do estado trófico é quantificada por meio de variáveis que se relacionam diretamente com o processo de eutrofização, em geral “clorofila-a” (admitida como uma medida da biomassa de algas), as espécies algáceas presentes, a transparência das águas e as concentrações de nutrientes e oxigênio dissolvido (HAYDÉE, 1995). O Índice de Estado Trófico utiliza-se exatamente de algumas variáveis determinadas através de equações. Entre

os principais IET's citados por Toledo et al.(1984) estão o da EPA (1974), o de Pivone & Lee (1975), o de Shannon & Brezonik (1972) e o de Carlson (1974).

O IET de Carlson, pela sua simplicidade e objetividade, tem sido um dos mais largamente usados para classificação de lagos e reservatórios, embora tenha sido desenvolvido com base em dados de lagos e reservatórios de clima temperado. Este índice tem como variáveis a “clorofila-a”, a visibilidade do disco de *Secchi* e o fósforo (TOLEDO et al., 1984; DUARTE et al., 1997). Considera-se, como critério na definição de estados tróficos, a duplicação da concentração de biomassa de algas, ou seja, cada vez que ocorre uma duplicação nesta concentração é reconhecido um novo estado trófico. Assim, devido à relação inversa entre a concentração de biomassa e a transparência da água, cada duplicação de biomassa corresponde à metade da transparência (CARLSON, 1977).

O valor do Índice de Carlson pode ser calculado separadamente para cada uma das variáveis independente, ou média aritmética dos três índices. Em lagos limitados pelo fósforo ou de alta turbidez mineral os valores do índice serão diferentes para cada variável. Os critérios do estado trófico, segundo o índice, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de Estado Trófico para o Índice de Carlson

IET	Estado Trófico
< 20	Ultra-oligotrófico - corpo hídrico de baixa produtividade e de alta transparência.
21 - 40	Oligotrófico - corpos hídricos de baixa produtividade em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água.
41 - 50	Mesotrófico - corpos hídricos com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis na maioria dos casos.
51 - 60	Eutrófico - corpos hídricos com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, em que ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água e interferências nos seus múltiplos usos.
> 61	Hipereutrófico - corpos hídricos afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos podendo, inclusive, estarem associados a episódios de floração de algas e de mortandade de peixes, e causar consequências indesejáveis sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Fonte: TOLEDO et al. (1984)

2.5 Índices de Estado Trófico Modificado (IET_M)

Uma outra análise realizada refere-se ao cálculo do Índice de Estado Trófico para região semi-árida, desenvolvidos por Toledo et al. (1984), que propuseram uma modificação do IET de Carlson (1977), incluindo ainda uma expressão para o ortofosfato solúvel. As equações utilizadas de 2.1 a 2.3 exprimem o Índice do Estado Trófico de Carlson Modificado (IET_M):

$$IET_M(PT) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.1)$$

$$IET_M(CL_A) = 10 * \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695 \ln CL_A}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.2)$$

$$IET_M(OS) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{21,67}{OS}}{\ln 2} \right) \right] \quad (2.3)$$

Onde:

PT = Concentrações de Fósforo Total;

CL_A = Concentrações de Clorofila-a;

OS = Concentrações de Ortofosfato Solúvel.

Foram utilizados os três índices: $IET_M(PT)$, $IET_M(CL_A)$ e $IET_M(OS)$ e, a seguir, calculou-se a média deste Índice (IET_M) que, ao final, foi classificado de acordo com a Tabela 3:

Tabela 3 – Classificação do Estado Trófico segundo o Índice de Carlson Modificado

Critério	Estado Trófico
$IET \leq 44$	Oligotrófico
$44 < IET \leq 54$	Mesotrófico
$54 < IET \leq 74$	Eutrófico
$IET > 74$	Hipereutrófico

Fonte: CETESB (2002)

Esta versão do índice de Estado Trófico tem-se mostrado mais adequada para a determinação do estado trófico em lagos de clima predominantemente tropical, segundo Tundisi et al., 1995, Calijuri, 1988 e Ceballos, 1995.

2.6 Correlação entre as Concentrações de Fósforo e Clorofila-a

Ultimamente, pesquisas têm buscado correlações entre a concentração de fósforo na coluna de água e algum tipo de medida de biomassa fitoplanctônica, como a clorofila-a. Geralmente se obtém uma grande variância entre a melhor curva de regressão, trazendo dificuldades para correlacionar estas duas variáveis. Diversas razões são atribuídas a este fato, tais como, limitação da luz, absorção de nutrientes pelas algas, aplicação de algicidas, temperatura, formato do lago e outros.

2.7 Lógica Fuzzy

Vários métodos de classificação têm sido usados para estimar o estado de mudança e usabilidade das águas superficiais nos reservatórios. A discrepância frequentemente surge da falta de uma clara distinção entre cada modo de utilização da água, a incerteza nos critérios de qualidade da água empregada e imprecisão ou inexatidão incorporado na tomada de decisão dos valores de saída. Nos últimos anos, os métodos *fuzzy* demonstraram ser adequados para lidar com incerteza e subjetividade nas questões ambientais.

Uma das tarefas difíceis é como transferir a interpretação de dados complexos em informações que sejam compreensíveis e úteis para os indivíduos técnicos, bem como o público em geral. Internacionalmente, tem havido uma série de tentativas de produzir um método que significativamente integra os conjuntos de dados e convertê-los em informações (NAGELS et al., 2001).

Na modelagem de complexos problemas ambientais, os pesquisadores frequentemente falham em fazer afirmações precisas sobre os insumos e os resultados, mas a lógica *fuzzy* pode ser aplicada para o desenvolvimento dos índices ambientais de uma forma que resolve vários problemas comuns, incluindo a incompatibilidade das observações e da necessidade de julgamentos de um valor implícito (MCKONE, T. E., 2005).

A lógica *fuzzy* pode ser considerada como uma linguagem que permite traduzir as declarações sofisticadas de linguagem natural para um formalismo matemático (MCNEIL, F. M. & THRO, E., 1994).

A lógica *fuzzy* pode lidar com dados altamente variável, linguístico, vago e incerto ou de conhecimento e, portanto, tem a capacidade de permitir um fluxo de informações lógico, confiável e transparente de recolha de dados para uso de dados em aplicações ambientais. A lógica *fuzzy* tem sido utilizada para avaliar a qualidade da água através do desenvolvimento de um índice de qualidade da água com base no raciocínio *fuzzy* (DUQUE et al., 2006).

Técnicas baseadas na Teoria *Fuzzy* podem fornecer um meio para medir a intensidade de ultrapassar os limites regulamentados com a ajuda de funções de pertinência de vários níveis de qualidade da água. Ela tem sido aplicada extensivamente na classificação da qualidade da água dos recursos hídricos (CHANG et al., 2001).

De acordo com Abdullah et al. (2008), a *fuzzificação* é o processo para definir as entradas e saídas, bem como sua respectiva função de pertinência que transformam o valor numérico de uma variável em uma associação de classe para um conjunto *fuzzy*. Após as entradas serem *fuzzificadas*, o grau para cada parte do antecedente é satisfeita para cada regra. Se o antecedente de uma dada regra, tem mais de uma parte, o operador *fuzzy* é aplicado para obter um número que representa o resultado do antecedente para essa regra. Este número é então aplicado para a função de saída. A entrada para o operador *fuzzy* é de dois ou mais valores de adesão a partir de variáveis de entrada *fuzzificadas*. A saída é um valor de verdade única. A entrada para o processo de implicação é um número único dada pelo antecedente, e a saída é um conjunto *fuzzy*. A implicação de uma falha qualquer de medida é implementada para cada regra pela teoria. Como as decisões são baseadas na análise de todas as regras em um sistema de inferência *fuzzy* (SIF), as regras devem ser combinadas de alguma maneira, a fim de tomar uma decisão.

2.8 Conjuntos Difusos (Conjuntos *Fuzzy*)

A Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985) é um método matemático usado para caracterizar e quantificar a incerteza e imprecisão nos dados e relações funcionais. Conjuntos difusos são especialmente úteis quando o número de dados não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio de medidas padrão estatística envolvendo a estimativa de frequências.

De acordo com Ganoulis (1994) o conceito central da teoria dos conjuntos *fuzzy* é a função de pertinência que representa numericamente o grau em que um elemento pertence a um conjunto. Se um elemento pertence a um conjunto *fuzzy* em algum grau, o valor da sua função de pertinência pode ser qualquer número entre 0 e 1. Quando a função de pertinência de um elemento pode ter os valores 0 ou 1, apenas, a teoria dos conjuntos se reduz à teoria clássica dos conjuntos.

Um conjunto *fuzzy* consiste em um conjunto de pares ordenados que contém o elemento e seu valor de pertinência. Formalmente, um conjunto \tilde{F} é chamado *fuzzy* em um universo Ω , se ela consiste de pares ordenados tais que:

$$\tilde{F} = \left\{ (\omega, \mu_{\tilde{F}}(\omega)) : \omega \in \Omega; \mu_{\tilde{F}}(\omega) \in [0, 1] \right\}$$

Em contraste com as regras básicas de probabilidade, na teoria dos conjuntos *fuzzy*, as regras a seguir são definidas na forma de axiomas para avaliar a função de pertinência da união $\tilde{A} \cup \tilde{B}$ e da intersecção $\tilde{A} \cap \tilde{B}$ dos conjuntos *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} . Para cada dois conjuntos \tilde{A} , \tilde{B} pertencente a Ω , temos:

$$\begin{aligned} \forall \tilde{A}, \tilde{B} \subseteq \Omega; \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(\omega) &= \max(\mu_{\tilde{A}}(\omega), \mu_{\tilde{B}}(\omega)) \\ \forall \tilde{A}, \tilde{B} \subseteq \Omega; \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(\omega) &= \min(\mu_{\tilde{A}}(\omega), \mu_{\tilde{B}}(\omega)) \end{aligned}$$

Outra regra básica na teoria dos conjuntos *fuzzy* é de complementação. \tilde{A}_c é um conjunto *fuzzy*, o complemento de \tilde{A} , quando:

$$\mu_{\tilde{A}_c} = 1 - \mu_{\tilde{A}}$$

As regras de união, interseção e complementação na teoria dos conjuntos *fuzzy* não implica necessariamente que:

$$\tilde{A} \cap \tilde{A}_c = \emptyset \quad e \quad \tilde{A} \cup \tilde{A}_c = \Omega$$

como é verdade na abordagem probabilística. Ω é o universal ou referencial ou “sempre o evento certo” e \emptyset é o conjunto vazio, que se identifica com o “evento sempre impossível”. Isso significa que:

$$\forall \omega \in \Omega; \mu_{\Omega}(\omega) = 1 \quad e \quad \mu_{\emptyset}(\omega) = 0$$

2.9 Conjuntos nível h , Conjuntos *Fuzzy* Normal e Convexo

Para cada elemento ω pertencente a \tilde{A} , está associado um nível h de pertinência. Inversamente, considera-se todos os elementos tendo o mesmo nível de pertinência h . Assim, o *conjunto de nível h* de um conjunto fuzzy \tilde{A} , é definido como o conjunto ordinário de todos os elementos cujo valor de pertinência é h ou superior, ou seja:

$$A(h) = \{(\omega, \mu_{\tilde{A}}(\omega) \geq h); \omega \in \Omega; h \in [0, 1]\}$$

Um *conjunto fuzzy normal* é aquele em que pelo menos um valor de $\omega \in \Omega$ existe, tal que $\mu_{\tilde{A}}(\omega) = 1$. Em outras palavras, o valor máximo da função de pertinência é a unidade.

Um *conjunto fuzzy convexo* é um, onde para cada número real a, b, c e com $a < b < c$, aplica-se que: $\mu_{\tilde{A}}(b) \geq \min(\mu_{\tilde{A}}(a), \mu_{\tilde{A}}(c))$.

2.10 Números *Fuzzy*

Um número *fuzzy* \tilde{X} é um caso especial de conjuntos difusos, tendo as seguintes propriedades:

- (a) é definido no conjunto dos números reais \mathbb{R} , ao invés de um conjunto de propriedades lingüísticas.
- (b) a sua função de pertinência atinge sempre o valor máximo de 1, isto é, é um conjunto *fuzzy* normal.
- (c) a sua função de pertinência é unimodal, ou seja, consiste em uma parte crescente e decrescente.
- (d) uma aritmética completa está disponível para combinar números *fuzzy*, além disso, as funções multi-dimensional de números *fuzzy* podem ser definidas e calculadas (KAUFMANN & GUPTA, 1985; 1988).

Assim, a análise de incerteza *fuzzy*, as previsões do modelo *fuzzy* e risco *fuzzy*, e análise de confiabilidade podem ser realizadas.

Um número *fuzzy* pode ser formalmente definido como:

$$\tilde{X} = \left\{ (x, \mu_{\tilde{X}}(x)) : x \in \mathbb{R}; \mu_{\tilde{X}}(x) \in [0, 1] \right\}$$

2.11 Representação L-R de um Número *Fuzzy*

A função de pertinência de um número *fuzzy* pode ser descrito matematicamente por meio de duas funções estritamente decrescentes L e R (DUBOIS & PRADE, 1980).

Para um número *fuzzy* convexo, a parte de uma função de pertinência a esquerda do pico pode ser expressa em termos da variável adimensional $(x_m - x)/x_1$ como a função L. A parte correspondente, a direita do pico, é a função de R, que é expressa em termos da variável adimensional $(x - x_m)/x_2$.

$$\mu_{\tilde{X}} = \begin{cases} L\left(\frac{x_m - x}{x_1}\right), x \leq x_m \text{ e } x_1 > 0 \\ R\left(\frac{x - x_m}{x_2}\right), x > x_m \text{ e } x_2 > 0 \end{cases}$$

Pelo uso da notação L-R, um número *fuzzy* \tilde{X} é simbolicamente expresso como:

$$\tilde{X} = (x_m, x_1, x_2)_{LR}$$

2.12 Número *Fuzzy* Triangular (TNF)

O tipo mais simples de um número *fuzzy* é o triangular que é uma associação de funções de pertinência lineares de cada lado do pico.

2.13 Operações aritméticas em intervalos

Cálculo *Fuzzy* é uma extensão das operações realizadas em intervalos de números reais.

2.13.1 Adição

Um intervalo é definido como um par ordenado em colchetes como:

$$\bar{A} = [a_1, a_2] = \{a: a_1 \leq a \leq a_2\}$$

Onde a_1 é o limite esquerdo e a_2 é o limite direito de \bar{A} .

Tomando dois intervalos $\bar{A} = [a_1, a_2]$ e $\bar{B} = [b_1, b_2]$, a soma do intervalo é dada por:

$$\bar{C} = \bar{A} \oplus \bar{B} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2]$$

Operações com números *fuzzy* podem ser realizadas considerando seus intervalos de nível h , e depois aplicar as operações correspondentes em intervalos. De modo geral, tomando dois números *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} e seus correspondentes intervalos de nível h :

$$\bar{A}(h) = [a_1(h), a_2(h)] \text{ e } \bar{B}(h) = [b_1(h), b_2(h)]$$

Define-se a soma de dois números *fuzzy* como sendo:

$$\tilde{C} = \tilde{A} \oplus \tilde{B}$$

Logo, considerando o nível h temos:

$$\bar{C}(h) = \bar{A}(h) \oplus \bar{B}(h) = [a_1(h) + b_1(h), a_2(h) + b_2(h)] = [c_1(h), c_2(h)]$$

Em caso de números *fuzzy* triangulares a operação é simples:

$$\tilde{C} = \tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3) = (c_1, c_2, c_3)$$

2.13.2 Subtração

Tomando dois intervalos $\bar{A} = [a_1, a_2]$ e $\bar{B} = [b_1, b_2]$. O intervalo oposto de \bar{B} é a imagem espelhada de \bar{B} , tendo o ponto 0 como origem, ou seja:

$$-\bar{B} = [-b_2, -b_1]$$

Assim, a diferença entre os intervalos \bar{A} e \bar{B} é:

$$\bar{C} = \bar{A} \ominus \bar{B} = \bar{A} \oplus (-\bar{B}) = [a_1 - b_2, a_2 - b_1]$$

Define-se o oposto de um número *fuzzy* \tilde{B} como sendo:

$$\bar{B}^-(h) = [-b_2(h), -b_1(h)]$$

Logo, considerando o nível h temos:

$$\bar{C}(h) = \bar{A}(h) \ominus \bar{B}(h) = \bar{A}(h) \oplus \bar{B}^-(h) = [a_1(h) - b_2(h), a_2(h) - b_1(h)] = [c_1(h), c_2(h)]$$

Em caso de números fuzzy triangulares:

$$\tilde{C} = \tilde{A} \ominus \tilde{B} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1) = (c_1, c_2, c_3)$$

2.13.3 Multiplicação

O produto de dois intervalos $\bar{A} = [a_1, a_2]$ e $\bar{B} = [b_1, b_2]$ é dado pela simples relação:

$$\bar{C} = \bar{A} \otimes \bar{B} = [a_1 b_1, a_2 b_2]$$

Define-se o produto de dois números *fuzzy* \tilde{A} e \tilde{B} como sendo:

$$\tilde{C} = \tilde{A} \otimes \tilde{B}$$

Logo, considerando o nível h temos:

$$\bar{C}(h) = \bar{A}(h) \otimes \bar{B}(h) = [a_1(h) \cdot b_1(h), a_2(h) \cdot b_2(h)] = [c_1(h), c_2(h)]$$

Vale ressaltar que o produto de dois números *fuzzy* triangulares não é necessariamente outro número *fuzzy* triangular.

2.13.4 Divisão

Tomando dois intervalos $\bar{A} = [a_1, a_2]$ e $\bar{B} = [b_1, b_2]$. O intervalo inverso de \bar{B} é definido como sendo:

$$\bar{B}^{-1} = \left[\frac{1}{b_2}, \frac{1}{b_1} \right]$$

Assim, a razão entre os intervalos \bar{A} e \bar{B} é:

$$\bar{C} = \frac{\bar{A}}{\bar{B}} = \bar{A} \otimes (\bar{B}^{-1}) = \left[\frac{a_1}{b_2}, \frac{a_2}{b_1} \right]$$

Define-se o inverso de um número *fuzzy* \tilde{B} como sendo:

$$\bar{B}^{-1}(h) = \left[\frac{1}{b_2(h)}, \frac{1}{b_1(h)} \right]$$

Logo, considerando o nível h temos:

$$\bar{C}(h) = \bar{A}(h) \otimes \bar{B}(h) = \bar{A}(h) \otimes \bar{B}^{-1}(h) = \left[\frac{a_1(h)}{b_2(h)}, \frac{a_2(h)}{b_1(h)} \right] = [c_1(h), c_2(h)]$$

Vale ressaltar que a razão de dois números *fuzzy* triangulares não é necessariamente outro número *fuzzy* triangular.

2.14 Riscos e Incertezas

Segundo Raftery (1994), o risco tem atributos quantificáveis, enquanto a incerteza não os tem. Ao risco estaria sempre associada uma certa função de probabilidades enquanto a incerteza não permitiria essa associação.

2.14.1 Risco

O risco é um fator abstrato, representado matematicamente por uma probabilidade de ocorrência de um fato indesejável. A ocorrência do fato representa, nesta relação, o fator concreto. O risco está presente em todas as decisões que tomamos em nosso cotidiano.

Risco em problemas de qualidade da água é definido em termos de concentração máxima permitida de um determinado poluente, como indicado pelas normas de qualidade da água. A fim de compreender as razões que levaram ao desenvolvimento de especificações relativas à qualidade ambiental da água, é útil resumir os elementos do problema.

Há considerações ecológicas e de saúde pública para a preservação de um nível satisfatório de qualidade das águas doces e costeiras, tendo em conta o risco de poluição dessas águas para os organismos, espécies e ecossistemas. Estes riscos afetam também os seres humanos, através do uso da água e do consumo de produtos advindos da água.

2.14.2 Análise de Riscos

A análise de riscos pode ser definida como “um corpo de conhecimento (metodologia) que avalia e determina a probabilidade de um efeito adverso de um agente (químico, físico, ou outro), processo industrial, tecnologia, ou processo natural (MOLAK, 1997).

A análise de riscos é uma ferramenta que permite, de forma racional, organizar e processar dados a respeito de eventos indesejáveis relacionados a uma atividade, possibilitando uma antecipação ao fato ou, pelo menos, a adoção de medidas que atenuem os efeitos negativos da ocorrência do fato.

A análise de riscos é uma ferramenta valiosa na gestão dos recursos hídricos por possibilitar a quantificação da probabilidade ou possibilidades de ocorrência de um efeito indesejável, como o processo de eutrofização. Conhecendo-se o risco, é possível melhor gerenciá-lo,

concentrando-se esforços e recursos na redução dos fatores de pressão que elevam o risco em determinadas áreas ou situações (CHAPMAN & WARD, 1997).

Segundo Vieira (2005), a análise de risco compreende duas etapas:

✓ 1ª etapa: Qualificação ou identificação dos riscos

Diz respeito ao levantamento das incertezas existentes, os tipos de riscos associados, suas causas e formas de ocorrência.

✓ 2ª etapa: Quantificação ou avaliação dos riscos

Materializa em número as probabilidades ou possibilidades de ocorrência de eventos indesejáveis ou falhas de projeto, bem como quantifica as conseqüências desses eventos, quer em termos físicos, econômicos, sociais ou ambientais.

2.14.3 Avaliação de Riscos

Processo de estimativa de probabilidade da ocorrência de fato e a provável magnitude dos efeitos negativos no decorrer do tempo.

2.14.4 Análise de Riscos x Avaliação de Riscos

É comum ver na literatura o emprego dos termos Análise de Riscos e Avaliação de Riscos como sinônimos. Analisar é decompor em partes para examinar cada uma delas, com ela buscamos dos efeitos às causas, partimos do particular ao geral, do simples para o composto. Avaliar, no entanto, é dar valor, é proceder a uma estimativa. Dessa forma, quando avaliamos um risco, estamos apenas dando um grau de significância; quando analisamos um risco, estamos investigando suas causas, suas especificidades e generalizações, suas partes e o significado da composição destas partes.

2.14.5 Risco e Garantia *Fuzzy*

Risco é a probabilidade ou possibilidade de ocorrência de eventos, fatos ou resultados indesejáveis. Por outro lado, os eventos desejáveis ou benéficos conduzem à noção de garantia ou confiabilidade.

Se um evento, ou a realização de um perigo é descrito por meio da lógica *fuzzy*, então a confiabilidade desse evento pode ser calculado como um número *fuzzy*. Considere agora que o sistema tem uma resistência \tilde{R} e uma carga \tilde{L} , ambos representados por números *fuzzy*. Uma medida de confiabilidade ou uma margem de segurança do sistema (\tilde{M}) pode ser definido pela diferença entre a carga e resistência (SHRESTA et al., 1990). Este é também um número *fuzzy* dado por:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L}$$

Tomando a intervalos de nível h , como:

$$R(h) = [R_1(h), R_2(h)]$$

$$L(h) = [L_1(h), L_2(h)]$$

Então, para cada $h \in [0,1]$, a margem de segurança $M(h)$ é obtida pela subtração entre $R(h)$ e $L(h)$, que é:

$$M(h) = R(h) - L(h)$$

Duas possíveis condições existem:

- (a) Falha: $M(h) < 0$
- (b) Garantia: $M(h) \geq 0$

O risco *Fuzzy* pode ser definido por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}$$

Uma medida *fuzzy* de confiabilidade, ou índice de confiabilidade *fuzzy* pode ser definido por:

$$GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}$$

Onde:

RF = risco *Fuzzy*;

GF = garantia *Fuzzy*;

\tilde{M} = função marginal de segurança;

m = números *Fuzzy* da função marginal de segurança.

3 METODOLOGIA

Considerando que a pesquisa propõe como objetivo a avaliação do risco do Reservatório Acarape do Meio eutrofizar, a metodologia proposta consiste na *fuzzificação* das equações dos índices de estado trófico tanto para o fósforo total como para ortofosfato solúvel e clorofila-a. Assim, o processo metodológico é apresentado com base na combinação dos cálculos do IET_M e sua *fuzzificação*. Com isso, será aplicada uma metodologia para o cálculo do risco *fuzzy* e da garantia.

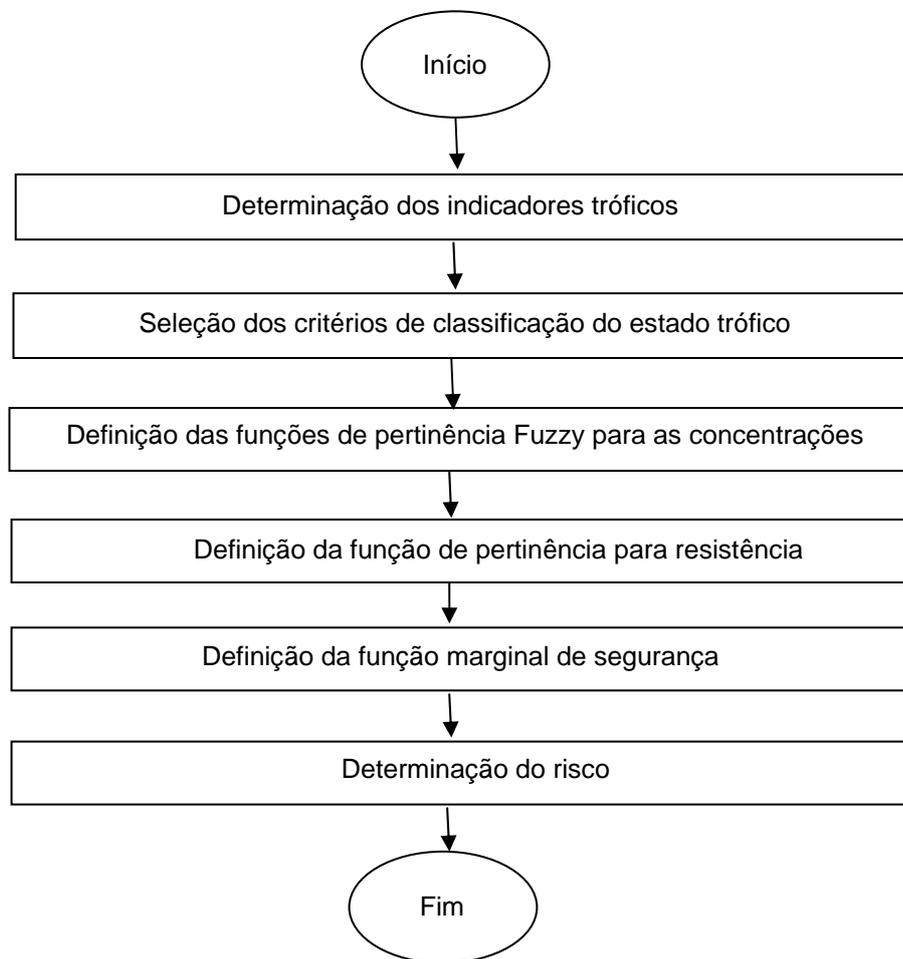


Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia proposta.

3.1 Caracterização do Açude Acarape do Meio

O Açude Acarape do Meio, objeto deste estudo, é banhado pelo Rio Pacoti. Sendo o principal manancial da Região Metropolitana de Fortaleza, o Rio Pacoti, nasce na Serra de Baturité e percorre 112,5km, em geral no sentido sudoeste/nordeste, dos quais o primeiro terço com declividade acentuada e ordem de 2,0%. Na parcela de jusante, como reflexo do relevo muito suave que atravessa sua declividade gira em torno de 0,1% (SRH-CE, 2001).

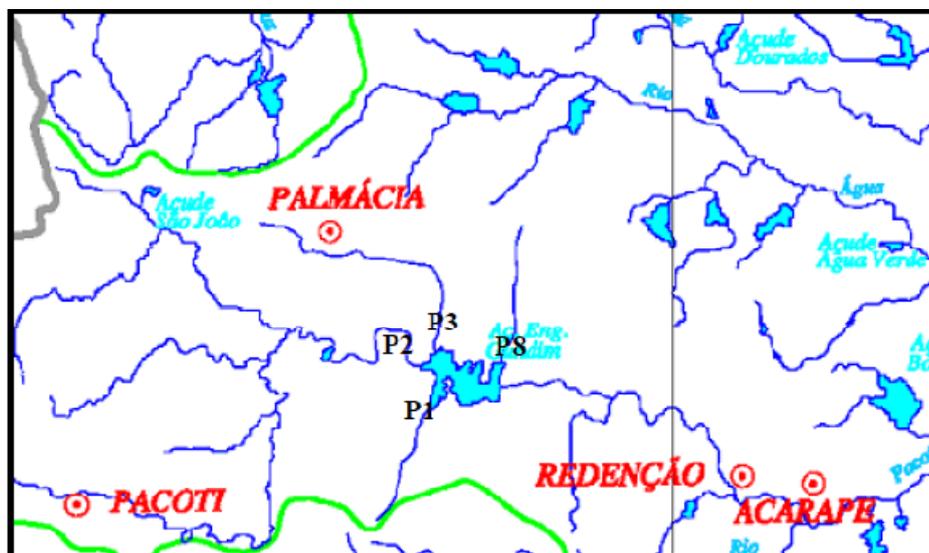


Figura 3.2 – Açude Acarape do Meio (Açude Eugene Gudim) localizado no centro. As cidades de Palmácia e Pacoti a montante e Redenção a jusante. Fonte: SRH-CE, 2001.

Atualmente está sob o gerenciamento da COGERH, responsável pelo gerenciamento e disciplinamento de mais de 90% das águas acumuladas no Estado, de forma descentralizada, integrada e participativa do Estado do Ceará (COGERH, 2011).

Este reservatório localiza-se em região montanhosa. Os rios barrados são Acarape e Pacoti (DATSENKO, 1999).

O rio Pacoti está inserido na Bacia Metropolitana. Esta Bacia, com 15.085 km², engloba um conjunto de bacias independentes com área variando de quase 60 km² (Riacho Caponga Funda) até 4.750 km² (Rio Choró), que inclui, também, as bacias responsáveis pelo abastecimento de Fortaleza (CEARÁ, 1992).

O açude Acarape do Meio faz parte da bacia hidrográfica do Rio Pacoti com área de drenagem de $210,96 \text{ km}^2$. Localizado no município de Redenção e fazendo parte do Sistema da Bacia Metropolitana. A capacidade da barragem é $31.500.000,00 \text{ m}^3$ e a vazão regularizada é de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$. A cota do sangradouro é de $130,02 \text{ m}$ e a largura de $60,00 \text{ m}$. A tomada d'água é do tipo galeria e o seu comprimento é de $45,00 \text{ m}$. (COGERH, 2011).

O açude Acarape do Meio não é mais fonte para o abastecimento d'água tratada do Sistema Integrado de Abastecimento d'água da Região Metropolitana de Fortaleza, mas este reservatório atendeu esta região até início dos anos 70.

O sistema de produção do Acarape atende o 1º Distrito Industrial com água bruta (vazão da ordem de $76,0 \text{ L/s}$), garante o suprimento das Estações de Tratamento de Água (ETA's) de Guaiúba, Pacatuba, Maranguape, Redenção, Acarape, Barreira, do distrito de Antônio Diogo e da perenização do vale entre os municípios de Redenção e Acarape (CAGECE, 2011).

Quando este açude está com a capacidade de acumulação comprometida, o açude Gavião fica responsável por este abastecimento (FREIRE, 2000). O Acarape do Meio é um dos açudes mais antigos, localiza-se na serra de Baturité, no município de Redenção no Estado do Ceará.



Figura 3.3 – Vista aérea do Açude Acarape do Meio. Fonte: COGERH, 2011.

3.2 Obtenção de dados e localização dos pontos de coleta

Como esta pesquisa trata de um estudo de qualidade d'água de um reservatório pertencente à Bacia Metropolitana de Fortaleza, notadamente o Reservatório do Acarape do Meio, há uma significativa parceria com a COGERH, órgão do governo do estado, que colaborou com a pesquisa.

Os dados foram obtidos a partir do estudo desenvolvido por Ribeiro (2007), onde com a ajuda da COGERH foram realizadas algumas campanhas nos anos de 2001 a 2006, exceto no ano de 2003. Esses dados foram trabalhados e *fuzzificados* com uma base de 20% para cada lado, onde a concentração central representa aquela com maior grau de pertinência de acordo com a figura abaixo:

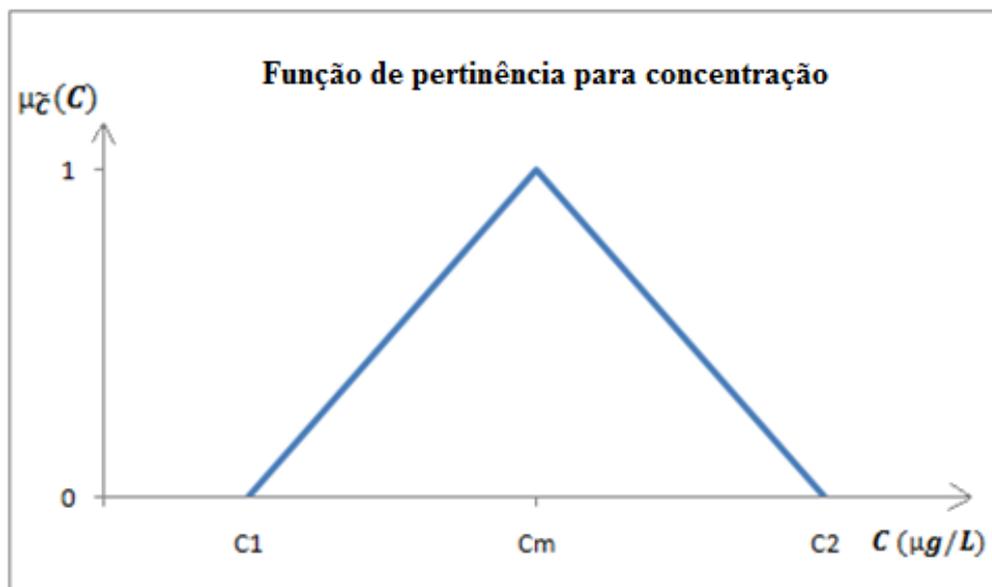


Figura 3.4 – Função de pertinência para concentração.

Desta forma este resultado fornece um campo de funções de pertinência para cada substância medida e para cada ponto do reservatório considerado. A figura abaixo mostra a distribuição dos pontos no reservatório.

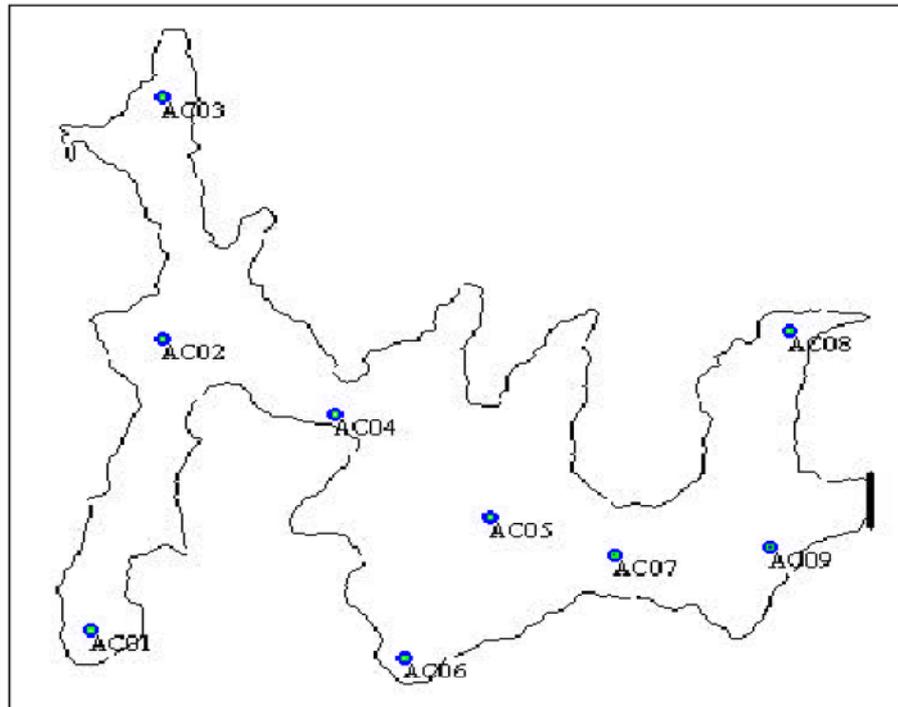


Figura 3.5–Localização das coordenadas dos pontos de coleta do açude Acarape do Meio. Fonte: COGERH, 2011.

Para monitoramento da qualidade da água do reservatório pela COGERH, foram selecionados 9 pontos georeferenciados, que são monitorados periodicamente por técnicos especializados. Foram escolhidos os seguintes pontos de monitoramento no reservatório:

- ✓ Ponto 1 – Entrada que vem de Genipapo;
- ✓ Ponto 2 – Eixo do Rio Pacoti e entrada que vem da cidade de Pacoti;
- ✓ Ponto 3 – Entrada que vem do município de Palmácia;
- ✓ Ponto 4 – Próximo ao ponto 5;
- ✓ Ponto 5 – Eixo do Rio Pacoti;
- ✓ Ponto 6 – Próximo à margem direita do reservatório;
- ✓ Ponto 7 – Entre os pontos 5 e 9;
- ✓ Ponto 8 – Vertedouro;
- ✓ Ponto 9 – Próximo à derivação da adutora que abastece o distrito industrial de Maracanaú.

É importante ressaltar que os pontos 1, 2 e 3 representam locais receptores d'água no reservatório em estudo. Em outras palavras, são as principais entradas que alimentam o

reservatório ao longo do ano. Enquanto que o ponto 8 está localizado próximo ao vertedouro do açude. Já o ponto 9 é um ponto situado nas proximidades da barragem.

Os pontos 2 e 3 recebem contribuições de zonas urbanas, enquanto o ponto 1 recebe contribuições de zonas rurais.

No ponto 1 existem plantações de banana, arroz, feijão e milho, além de criação de animais (porco e gado). No ponto 2, a montante localizam-se as cidades de Guaramiranga e Pacoti, caracterizando contribuições urbanas. No ponto 3 a montante, localiza-se a cidade de Palmácia que, até o momento, não conta com sistema de tratamento de esgoto. Este é um ponto que merece certo cuidado, pois possui contribuição de zona urbana com ausência de sistema de tratamento de esgoto. No ponto 6, próximo às margens, verificou-se uma forte presença de plantações de bananeiras executadas pela comunidade que habita nas proximidades do açude. Durante a construção do açude, o Estado não indenizou as terras onde hoje se encontra este açude, o que permite concluir que existem pessoas que habitam nas suas proximidades (RIBEIRO, 2007).

Os pontos foram localizados por coordenadas em UTM (Sistema Universal Transverso de Mercator). Também foi fornecido a batimetria do açude, que pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4 – Localização dos pontos de coleta no açude Acarape do Meio no município de Redenção e a batimetria (cotas).

	LATITUDE (UTM)	LONGITUDE (UTM)	Cota (m)
ACA-01	9536062	520060	118,6
ACA-02	9537177	520276	118,04
ACA-03	9538104	520273	121,4
ACA-04	9536888	520791	111,6
ACA-05	9536498	521253	109,6
ACA-06	9535954	520997	109,64
ACA-07	9536350	521617	104,6
ACA-08	9537207	522138	117,6
ACA-09	9536381	522083	105,6

Fonte: COGERH, 2011.

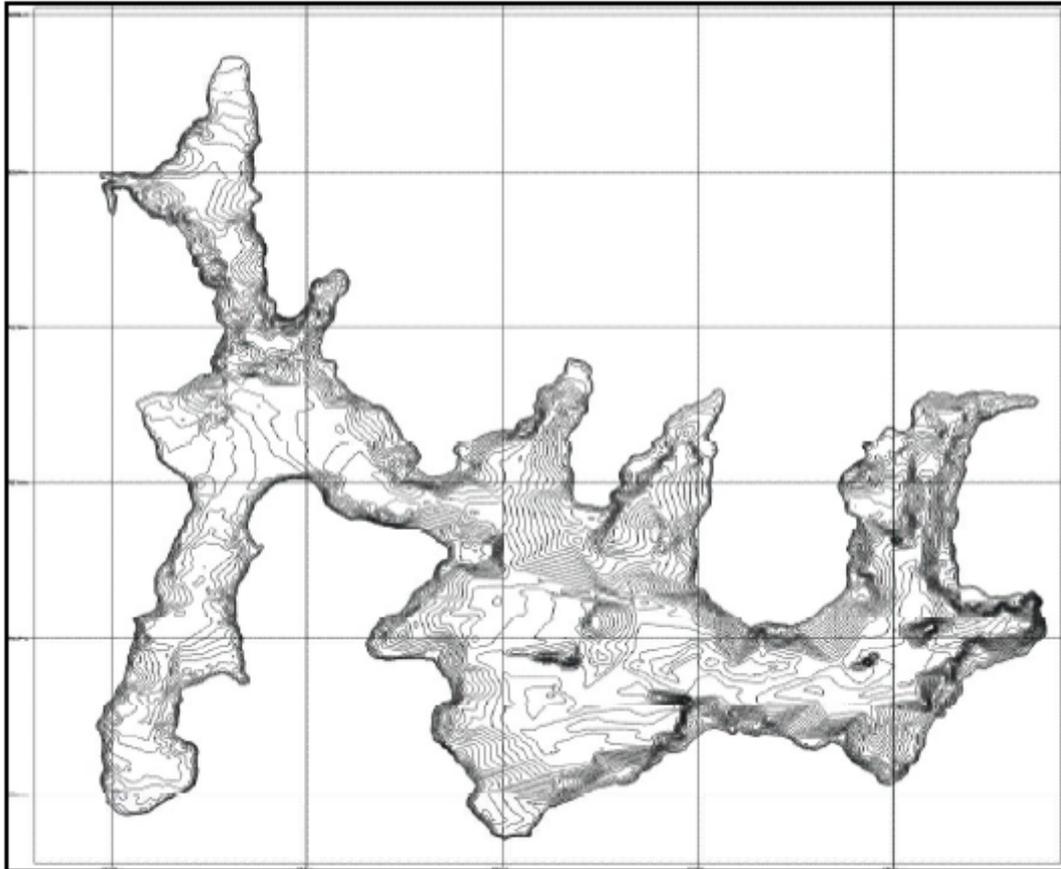


Figura 3.6 – Batimetria do Açude Acarape do Meio. Fonte: COGERH, 2011.

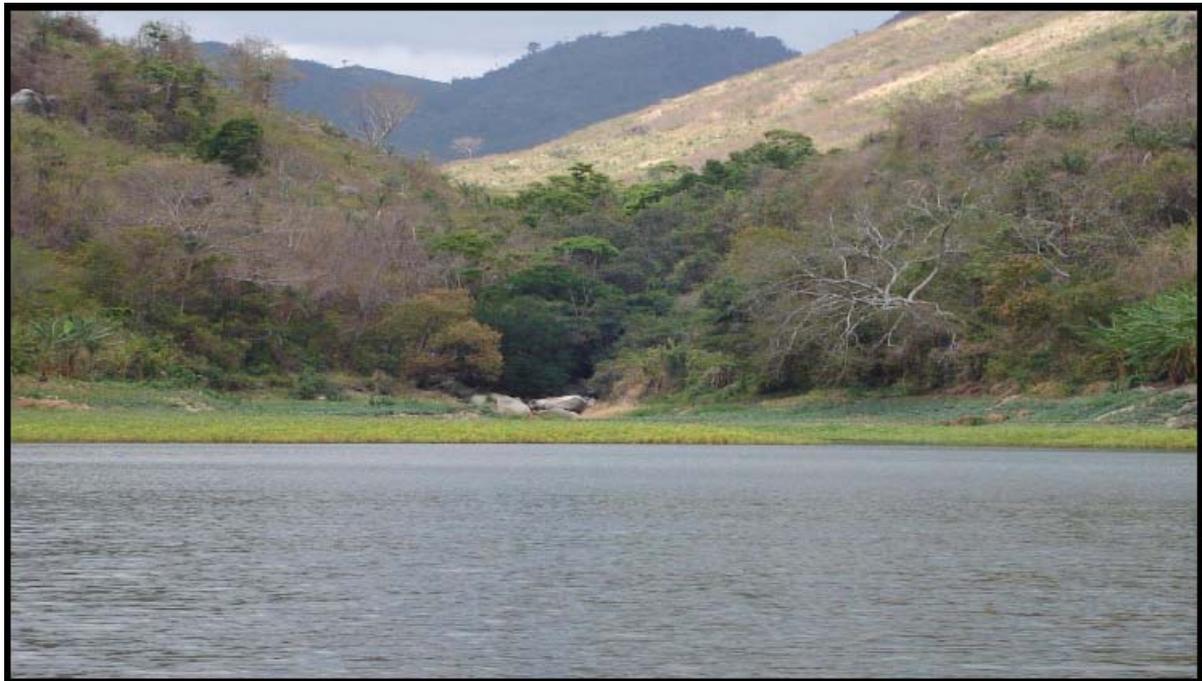


Figura 3.7 – Entrada no ponto 1 (local Genipapo). A montante, criação de animais (porco e gado) e presença de roçado (arroz, milho e feijão). Fonte: RIBEIRO, 2007.



Figura 3.8 – Entrada no ponto 2 que vêm do Rio Pacoti. Presença nas margens: macrófitas aquáticas, criação de animais à direita e plantação de bananeira à esquerda. Fonte: RIBEIRO, 2007.

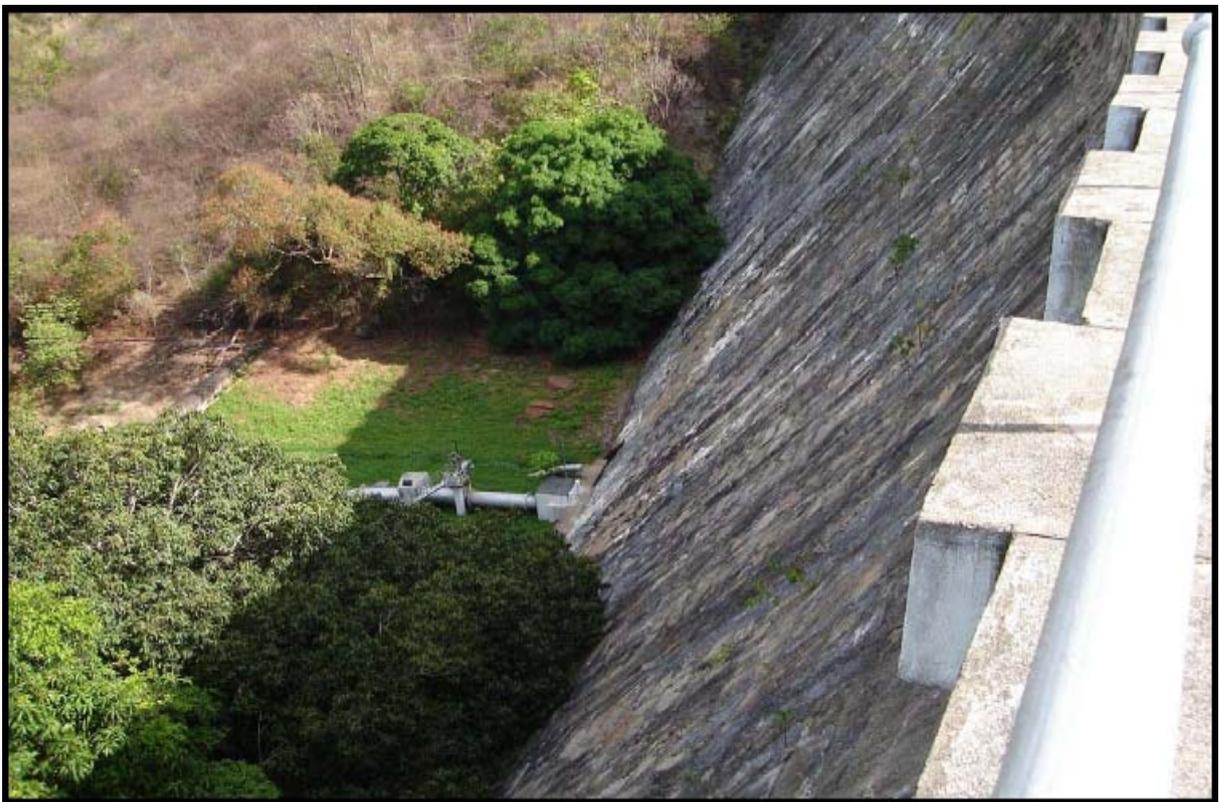


Figura 3.9 – Saída a jusante da barragem do Açude Acarape do Meio. Fonte: RIBEIRO, 2007.



Figura 3.10 – Saída da adutora a jusante da barragem do Açude Acarape do Meio (esquerda). Saída d'água para curso natural do Rio Pacoti a jusante (direita). Fonte: RIBEIRO, 2007.



Figura 3.11 – Açude Acarape do Meio – Ponto 9, próximo a barragem no dia 24/04/2006. Fonte: RIBEIRO, 2007.

3.3 Indicadores de qualidade

Para se estabelecer os critérios de qualidade foram usados os IET's para fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a para região semi-árida, desenvolvidos por Toledo et al. (1984), que propuseram uma modificação do IET de Carlson (1977), incluindo ainda uma expressão para o ortofosfato solúvel. As equações utilizadas de 3.1 a 3.3 exprimem o Índice do Estado Trófico de Carlson Modificado (IET_M):

$$IET_M(PT) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$IET_M(CL_A) = 10 * \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695 \ln CL_A}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.2)$$

$$IET_M(OS) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{21,67}{OS}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Onde:

PT = Concentrações de Fósforo Total;

CL_A = Concentrações de Clorofila-a;

OS = Concentrações de Ortofosfato Solúvel.

Foram utilizados os três índices: $IET_M(PT)$, $IET_M(CL_A)$ e $IET_M(OS)$ e, a seguir, calculou-se a média deste Índice (IET_M) que, ao final, foi classificado de acordo com a Tabela 3.

$$IET_M = \frac{IET_M(PT) + IET_M(CL_A) + IET_M(OS)}{3} \quad (3.4)$$

3.4 Fuzzificação dos Índices de Estado Trófico Modificado

Como o trabalho visa determinar o risco de eutrofização há a necessidade de se fazer uma *fuzzificação* das equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4) de modo que sejam incorporadas neste modelo as incertezas provenientes de medidas de observações de campo, deformidades das amostras de água em laboratório, entre outras. Este procedimento permite que as incertezas sejam quantificadas e o risco calculado. Para tal, as equações do IET_M se transformaram em:

$$\widetilde{IET}_M(PT) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{80,32}{\widetilde{PT}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.5)$$

$$\widetilde{IET}_M(CL_A) = 10 * \left[6 - \left(\frac{2,04 - 0,695 \ln \widetilde{CL_A}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.6)$$

$$\widetilde{IET}_M(OS) = 10 * \left[6 - \left(\frac{\ln \frac{21,67}{\widetilde{OS}}}{\ln 2} \right) \right] \quad (3.7)$$

Onde:

\widetilde{IET}_M representa a função de pertinência do IET_M ;

\widetilde{PT} representa a função de pertinência para concentração de fósforo total;

$\widetilde{CL_A}$ representa a função de pertinência para concentração de clorofila-a;

\widetilde{OS} representa a função de pertinência para concentração de ortofosfato solúvel.

A média deste Índice (\widetilde{IET}_M) é dada pela seguinte equação:

$$\widetilde{IET}_M = \frac{\widetilde{IET}_M(PT) + \widetilde{IET}_M(CL_A) + \widetilde{IET}_M(OS)}{3} \quad (3.8)$$

Essas funções são representadas de acordo com a figura abaixo:

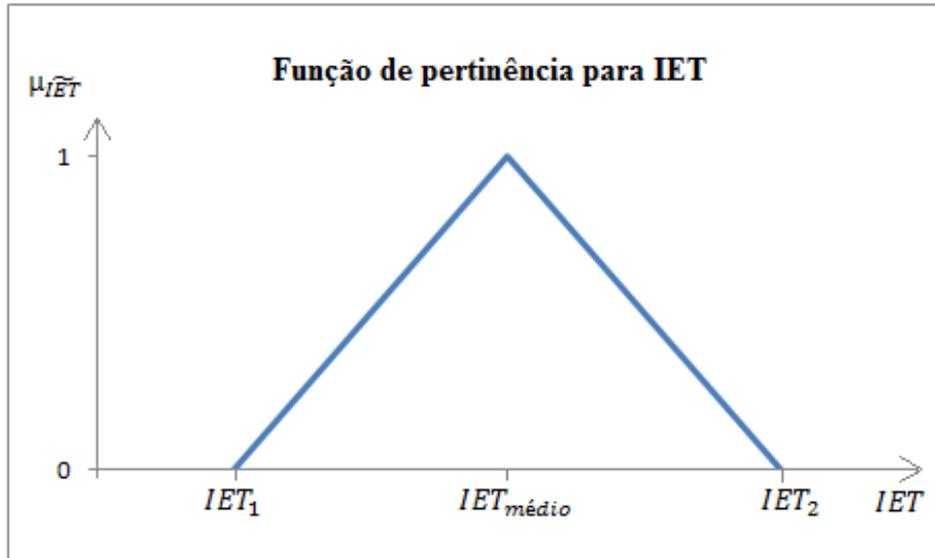


Figura 3.12 – Função de pertinência para IET.

3.5 Cálculo do risco

Para o cálculo do risco a metodologia *Fuzzy* prevê uma relação entre a carga poluente e uma resistência que nada mais é do que os limites estabelecidos em norma. Esses limites normalmente estabelecem as condições de qualidade do corpo hídrico. É importante observar que esta comparação é feita, na Teoria *Fuzzy*, em forma de funções de pertinência.

No presente estudo, a carga poluente representa as concentrações medidas no reservatório que foram *fuzzificadas*. Já a resistência representa os limites dos diferentes estágios de eutrofização do corpo hídrico. Por exemplo, no estado mesotrófico a função de pertinência é representada por: [45; 49; 54], onde 49 representa o valor do parâmetro com maior grau de pertinência. Assim, nós temos duas categorias de funções de pertinência definidos por:

$$\tilde{L} = [L_L, L_M, L_U]$$

$$\tilde{R} = [R_L, R_M, R_U]$$

Onde:

\tilde{L} = função de pertinência para a carga de concentração medida;

L_L = limite inferior da carga com grau de pertinência 0 (zero);

L_M = valor da carga com grau de pertinência 1 (um);

L_U = limite superior da carga com grau de pertinência 0 (zero);

\tilde{R} = função de pertinência para a resistência estabelecida por norma;

R_L = limite inferior da resistência com grau de pertinência 0 (zero);

R_M = valor da resistência com grau de pertinência 1 (um);

R_U = limite superior da resistência com grau de pertinência 0 (zero).

Uma vez calculadas essas duas funções de pertinência, define-se a função marginal de segurança (\tilde{M}) como:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L}$$

Como deve ser observado \tilde{M} que é resultado de uma operação entre funções de pertinência também é uma função de pertinência.

É importante notar que:

- Se $\tilde{M} \geq 0 \rightarrow RF = 0$ e $GF = 1$
- Se $\tilde{M} < 0 \rightarrow RF = 1$ e $GF = 0$

Onde:

RF = Risco *Fuzzy* que representa a possibilidade de falha do sistema;

GF = Garantia *Fuzzy* que representa a segurança do sistema não falhar.

De acordo com a Teoria *Fuzzy*, o risco e a garantia são definidos por:

$$RF = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}$$

$$GF = \frac{\int_0^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}$$

Onde:

\tilde{M} = função marginal de segurança;

m = números *Fuzzy* da função marginal de segurança.

Graficamente, o risco representa a área negativa dividida pela área total e a garantia representa a razão entre a área positiva e a área total.

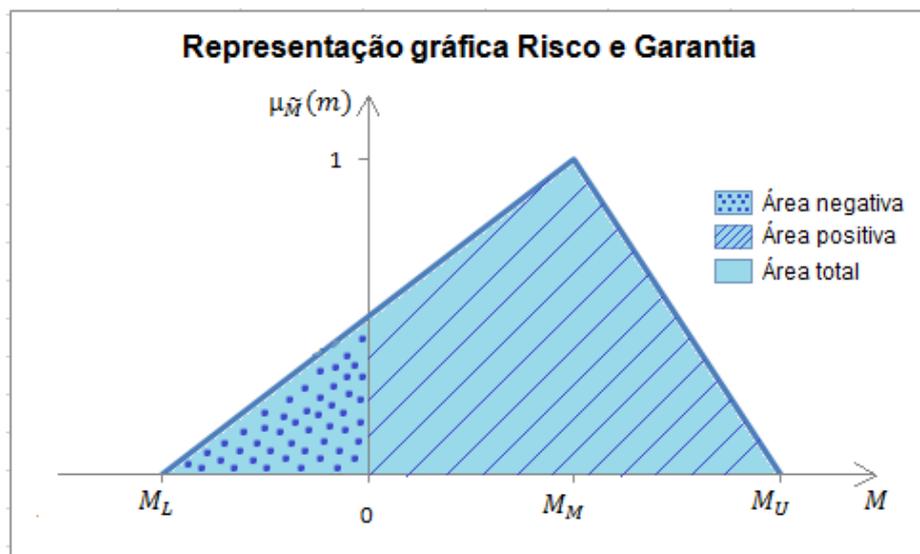


Figura 3.13 – Representação gráfica do risco e da garantia.

Para ilustrar a metodologia proposta, a figura abaixo mostra o esquema utilizado para o cálculo do risco do reservatório Acarape do Meio.

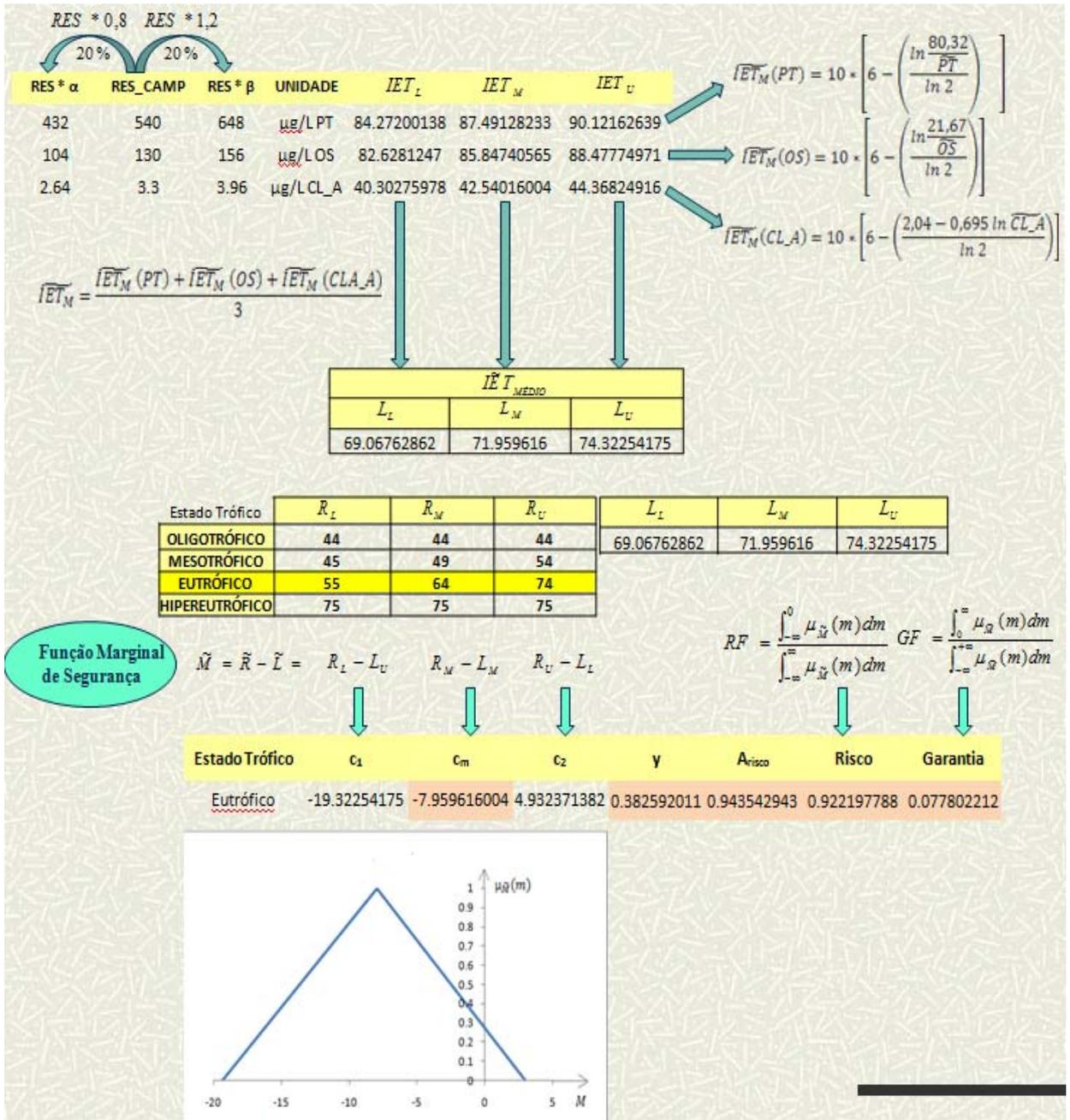


Figura 3.14 – Esquema utilizado para o cálculo do risco do reservatório Acarape do Meio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo a simulação proposta permite determinar o estado trófico de um reservatório em função dos seus parâmetros de qualidade. Para tal, foram usados os dados de fósforo total, ortofosfato solúvel e clorofila-a obtidos no reservatório Acarape do Meio entre os anos de 2001 a 2006, exceto o ano de 2003. O parâmetro tomado como base foi o Índice de Estado Trófico de Carlson Modificado desenvolvido pela CETESB. Os resultados abaixo foram calculados a partir de uma tabela no Microsoft Excel, onde cada concentração foi *fuzzificada* com um desvio de 20%, onde o valor médio representa o número *Fuzzy* com maior grau de pertinência.

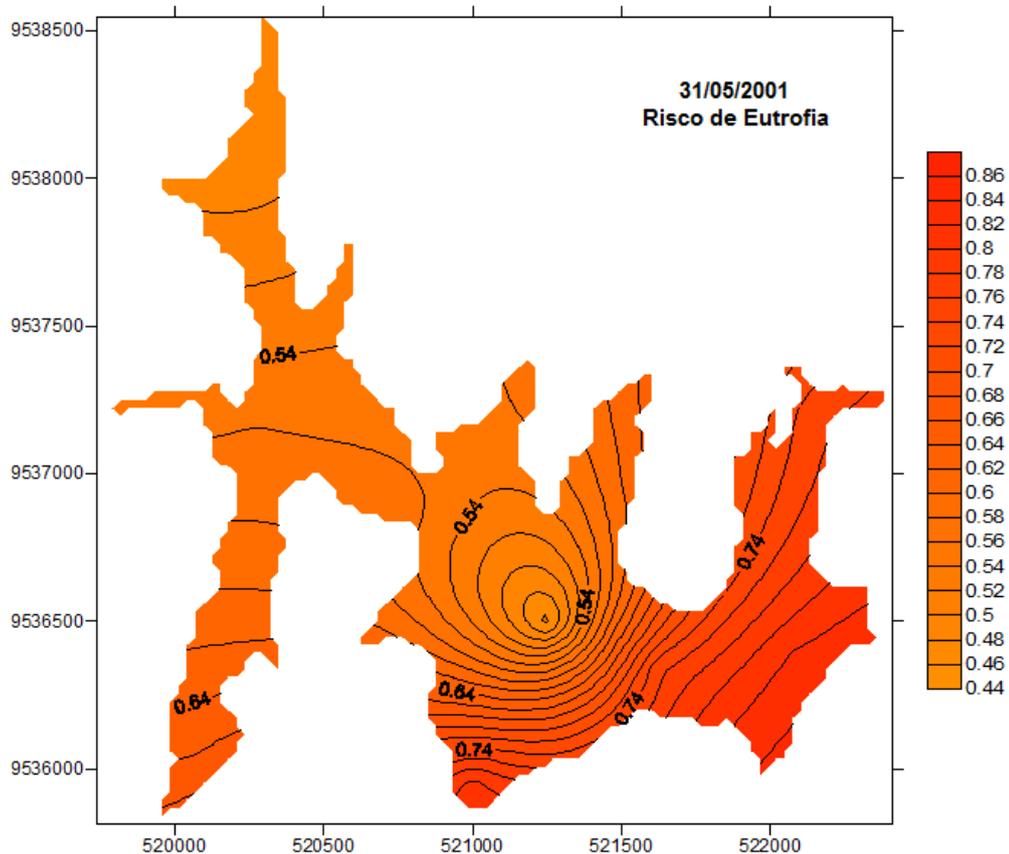
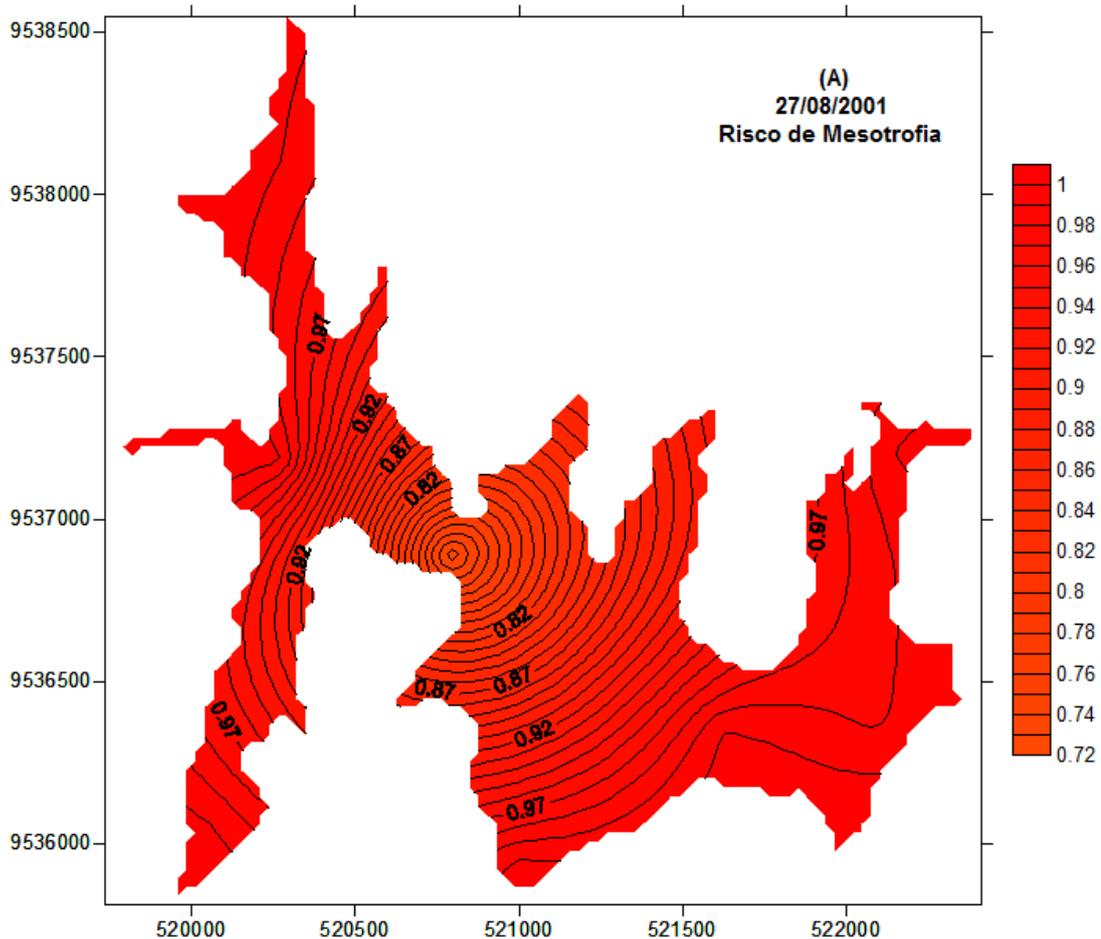


Figura 4.1 – Distribuição do risco de eutrofia para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2001.

Uma análise da Figura 4.1 permite mostrar que, nessa época do ano, o reservatório tem um risco alto de ser eutrofizado em quase toda a sua extensão, sendo que, nas proximidades da barragem, próximo aos pontos 7, 8 e 9 a situação é mais crítica, causando consideráveis preocupações.

Pela Figura 4.2 (A), os resultados calculados determinam que os riscos de mesotrofia encontram-se no intervalo entre 0,72 e 1,00. Este resultado mostra que, para este mês, as águas deste corpo hídrico se encontra em bom estado. Este fato é explicado pelo fato de que, nesta época do ano, o reservatório recebeu um aporte de água das estações chuvosas, ou seja, abril, maio e junho, fazendo com que o IET tenha caído. Na Figura 4.2 (B), os resultados mostram que o risco de eutrofização é baixo. As causas deste estado trófico foram explicadas anteriormente. É importante notar que, por exemplo, nas proximidades dos pontos 5, 7, 8 e 9, onde há um acúmulo maior de água, o risco de eutrofização é menor. Entretanto, nos pontos 1, 2 e 3, que representam as entradas no reservatório, o risco de eutrofização atingiu em torno de 90%, o que mostra uma entrada considerável de nutrientes provenientes dos efluentes das cidades a montante do reservatório.



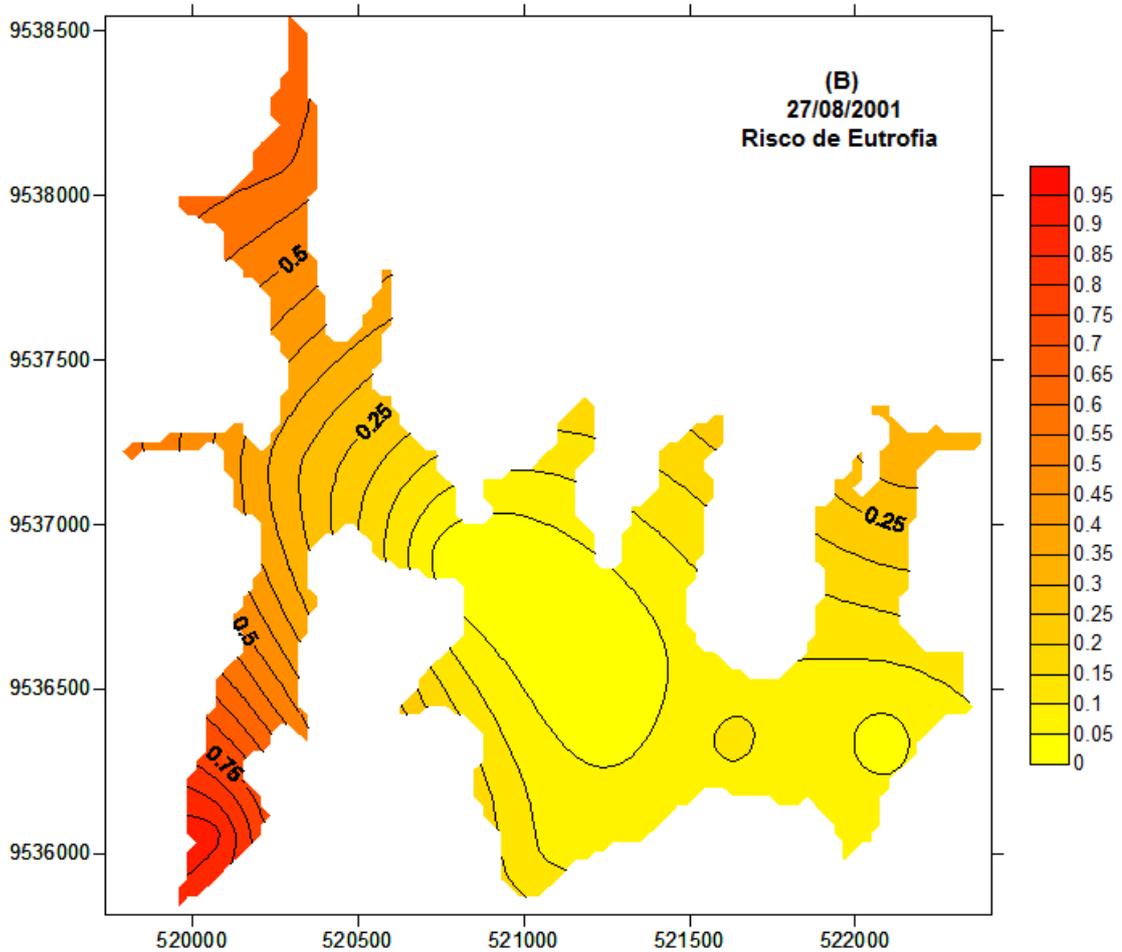


Figura 4.2 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto do ano de 2001. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.

Uma análise dos resultados da Figura 4.3 (A) mostra que o risco do reservatório ser mesotrófico é alto em toda extensão do mesmo, variando entre 0,76 e 1,00. Entretanto, uma análise da Figura 4.3 (B) mostra que o risco de eutrofização começa a aumentar neste período, atingindo 44% nas proximidades do ponto 2. Isso é explicado pelo fato que o processo de evaporação e do uso de água do reservatório se intensifica a partir desse mês de setembro, fazendo com que seu volume armazenado caia aumentando assim as concentrações de nutrientes. Esse resultado mostra a capacidade da metodologia proposta, onde é possível determinar o estado trófico de um reservatório em forma de análise de risco.

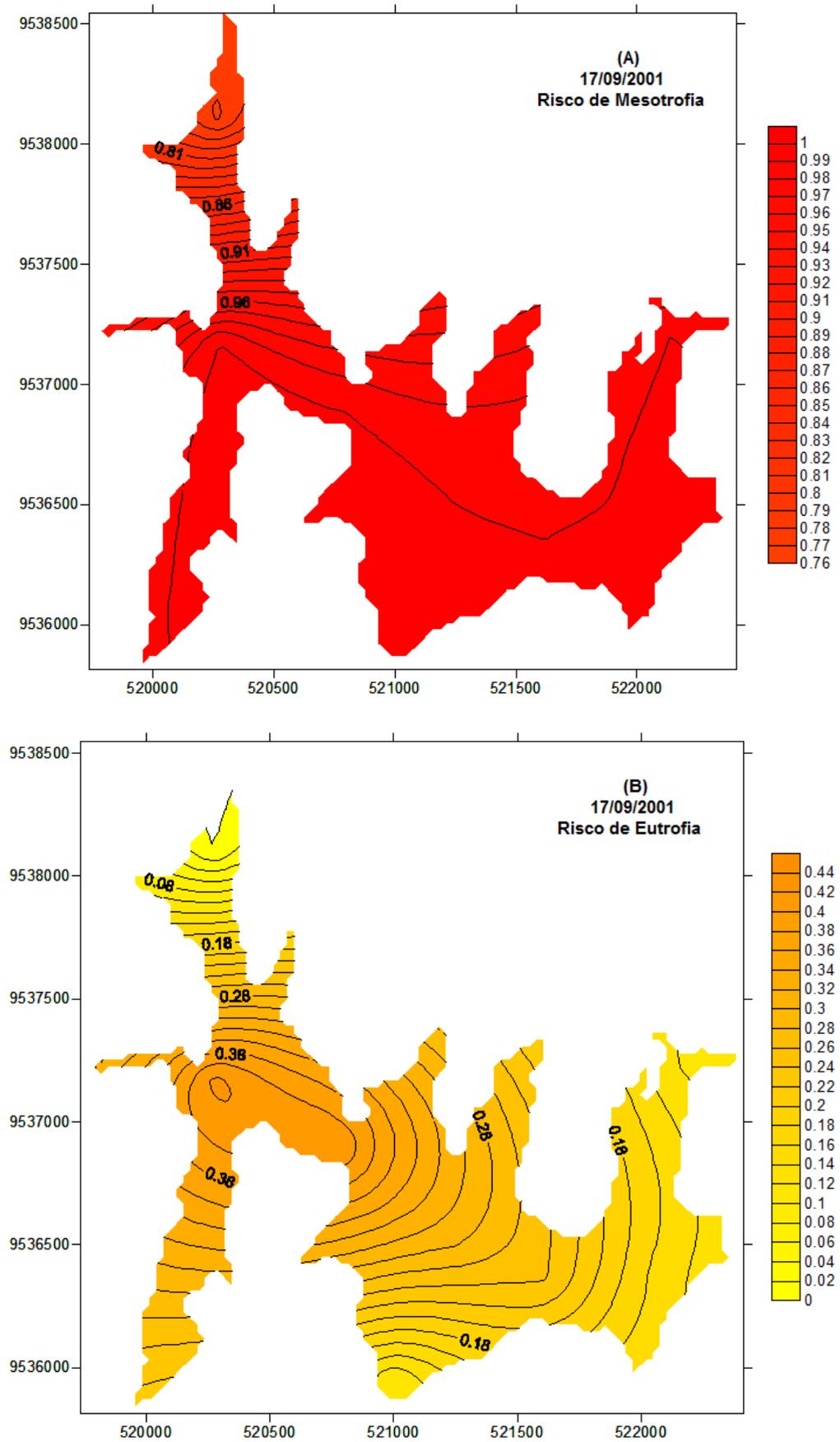


Figura 4.3 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de setembro do ano de 2001. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.

A Figura 4.4 mostra os resultados obtidos para o cálculo do risco para diferentes estados tróficos. Como pode ser observada através da figura, a versatilidade desta metodologia permite que uma análise completa possa ser realizada nas condições de um reservatório, com base na análise de risco. Estes resultados mostram que a aplicação da teoria *Fuzzy* nos processos de eutrofização pode se tornar uma importante ferramenta para os Gestores de Recursos Hídricos. A Figura 4.4 (B) mostra que no centro do reservatório o risco de mesotrofia é bem maior do que nas proximidades da barragem. Este resultado induz a concluir que as águas deste reservatório podem ter diferentes níveis tróficos para uma mesma época e que, assim, não é uma boa política aplicar modelos concentrados para estudar alguns reservatórios.

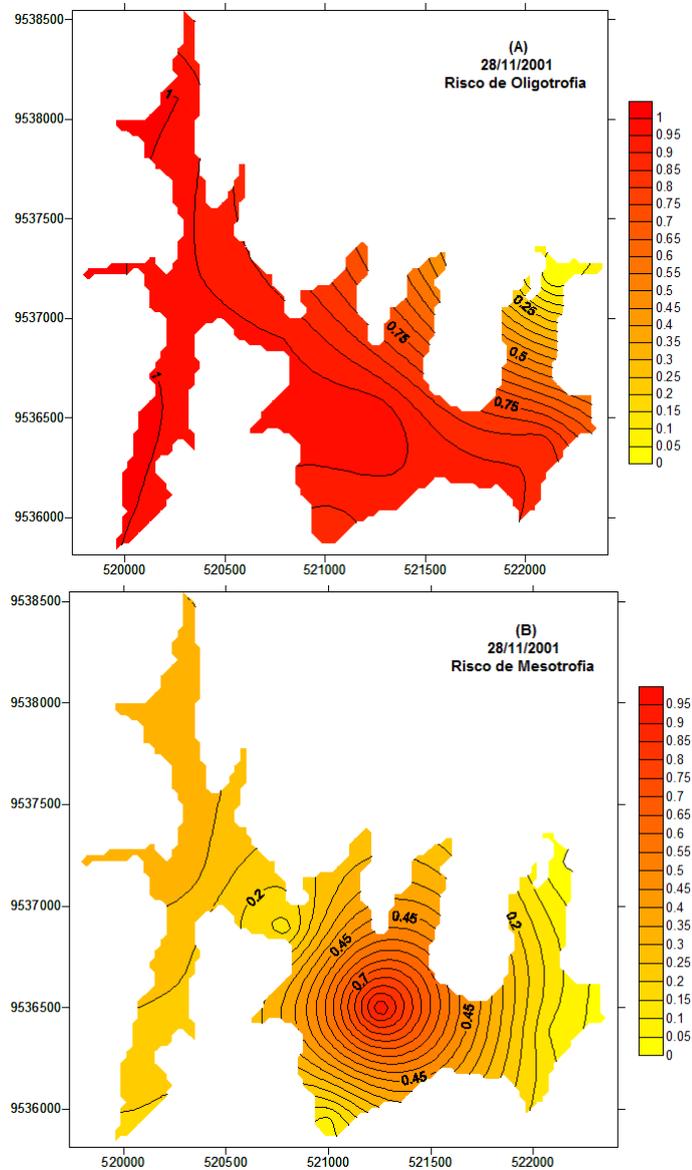


Figura 4.4 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de novembro do ano de 2001. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.

Na Figura 4.5, observa-se que o risco de eutrofização aumentou nas proximidades da barragem, o que permite concluir que o estado trófico deste reservatório tem uma dinâmica própria que depende da estação do ano e do aporte de nutrientes no reservatório. Por exemplo, de acordo com a figura, no ponto 3, o risco de eutrofização é maior que nos pontos 1 e 2 e, continua grande nos pontos 5, 6, 7, 8 e 9. Isso implica dizer que, como o ponto 3 é uma entrada, está havendo, nesse mês, um aporte maior de nutrientes proveniente dos efluentes que se encontram a montante do reservatório. De acordo com este período esse aporte é causado pelo um aumento das vazões em decorrência dos primeiros eventos chuvosos na bacia.

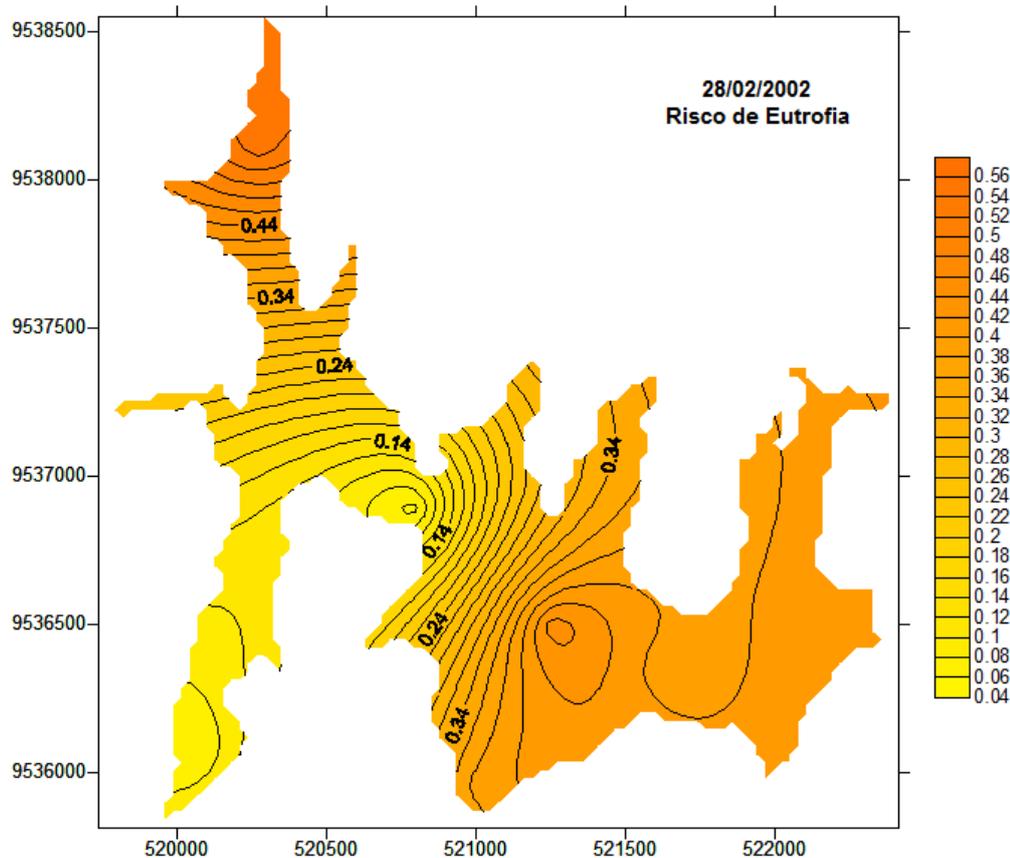


Figura 4.5 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio em fevereiro de 2002.

Os resultados da Figura 4.6 permitem concluir que neste ano de 2002 a qualidade das águas desse reservatório estava mais crítica que no ano anterior. Neste caso, o risco de eutrofização para algumas regiões já atingiu o nível acima de 70%. Este resultado se confirma através da Figura 4.7 quando nas proximidades da barragem o risco atingiu 88%. Do ponto de vista ambiental este é um nível bastante crítico que merece uma atenção especial. Neste caso, há a necessidade de um controle ambiental mais rigoroso para o aporte de nutrientes para o reservatório.

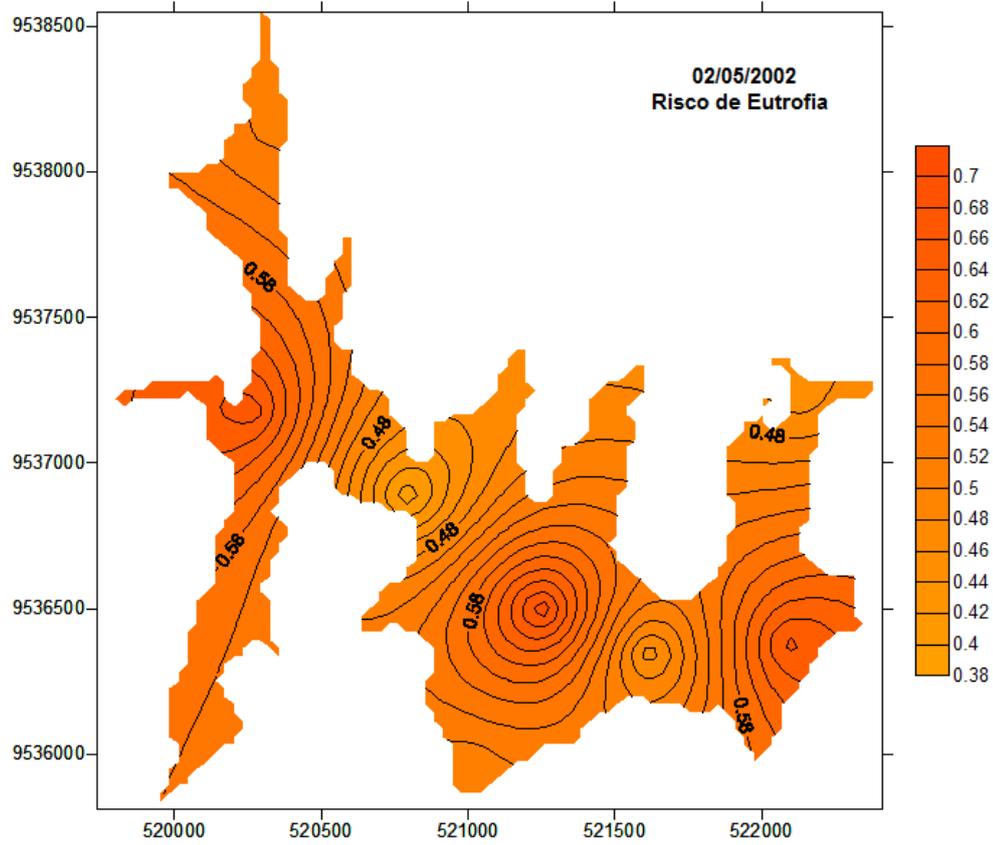


Figura 4.6 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio, no mês de maio de 2002.

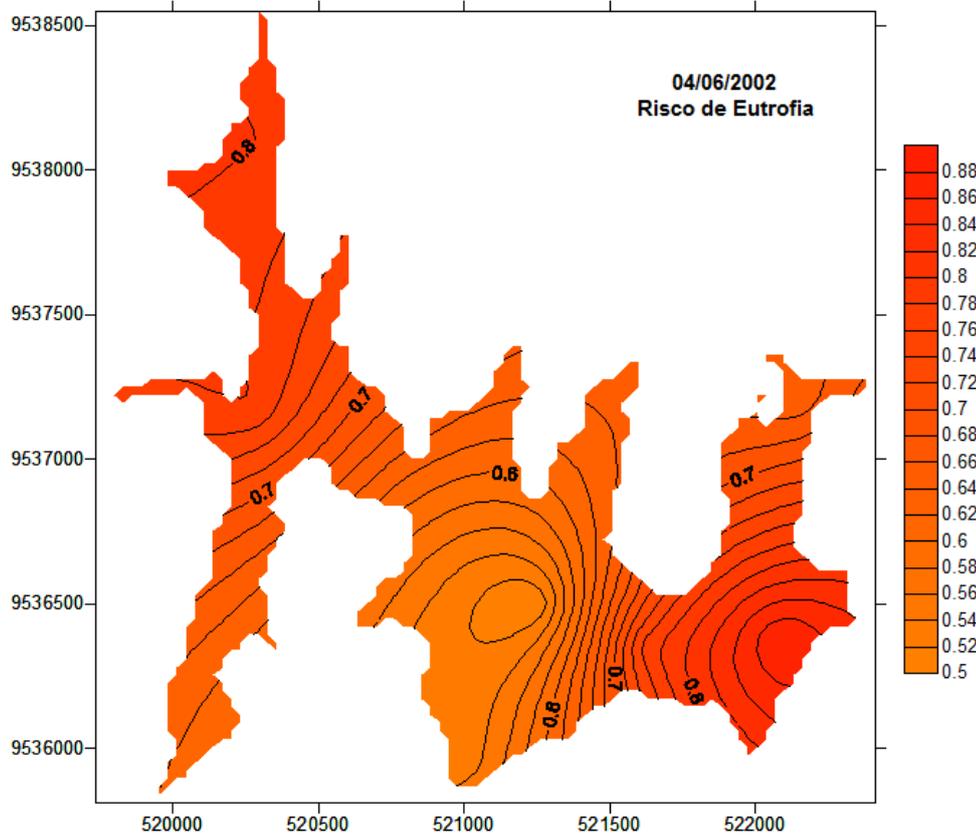


Figura 4.7 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio, no mês de junho de 2002.

A Figura 4.8 mostra que o estado trófico melhorou no mês de agosto de 2002, onde o risco de eutrofização caiu para um intervalo entre 18% e 45%. Isso é explicado pela capacidade de diluição do reservatório nesse mês, onde ele possui normalmente o seu volume máximo e começa a diminuir o aporte de nutrientes. A Figura 4.9 (A) e (B) mostra que o risco de eutrofização caiu para os padrões normais, ou seja, entre 0% e 24%, enquanto que o risco de mesotrofia aumentou consideravelmente, mostrando, assim, que o reservatório estava, nesta época, em bom estado.

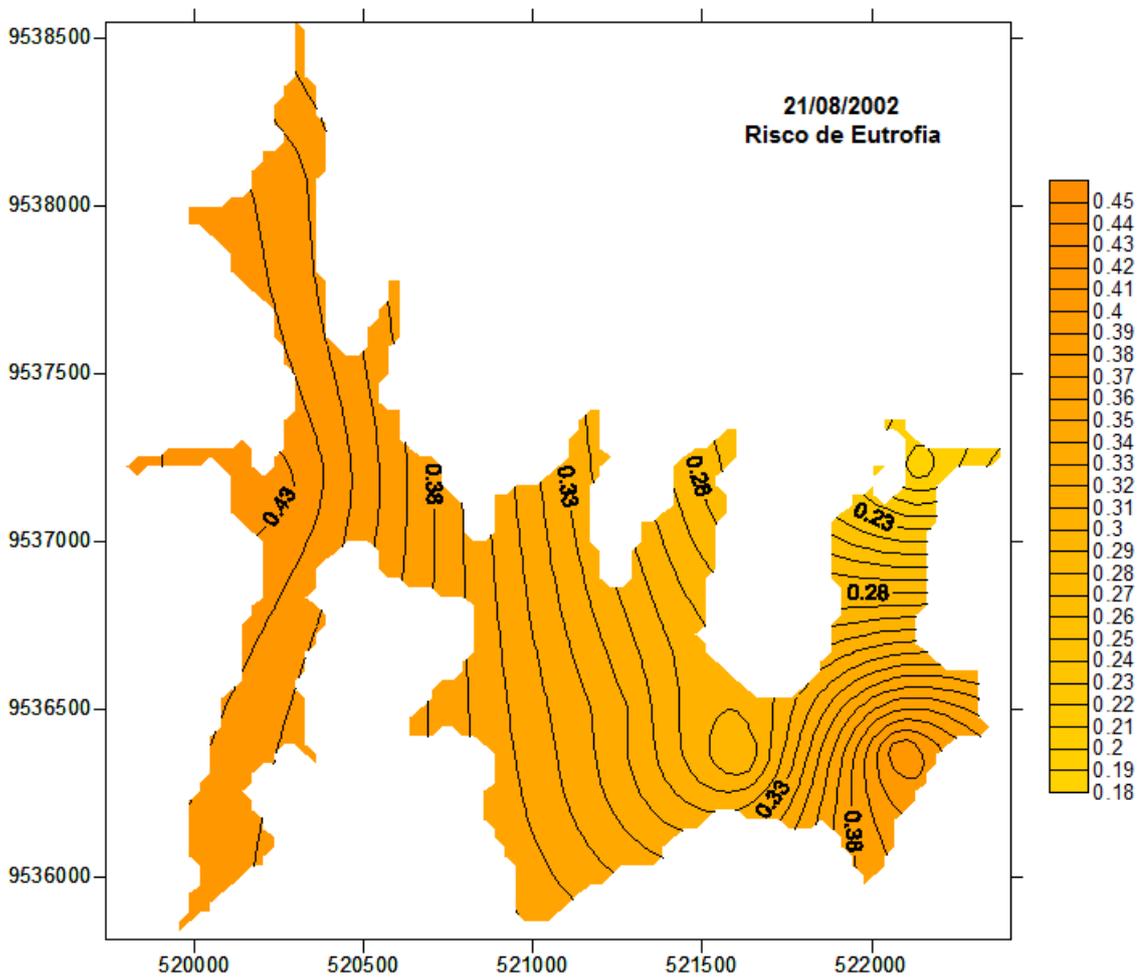


Figura 4.8 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio, no mês de agosto de 2002.

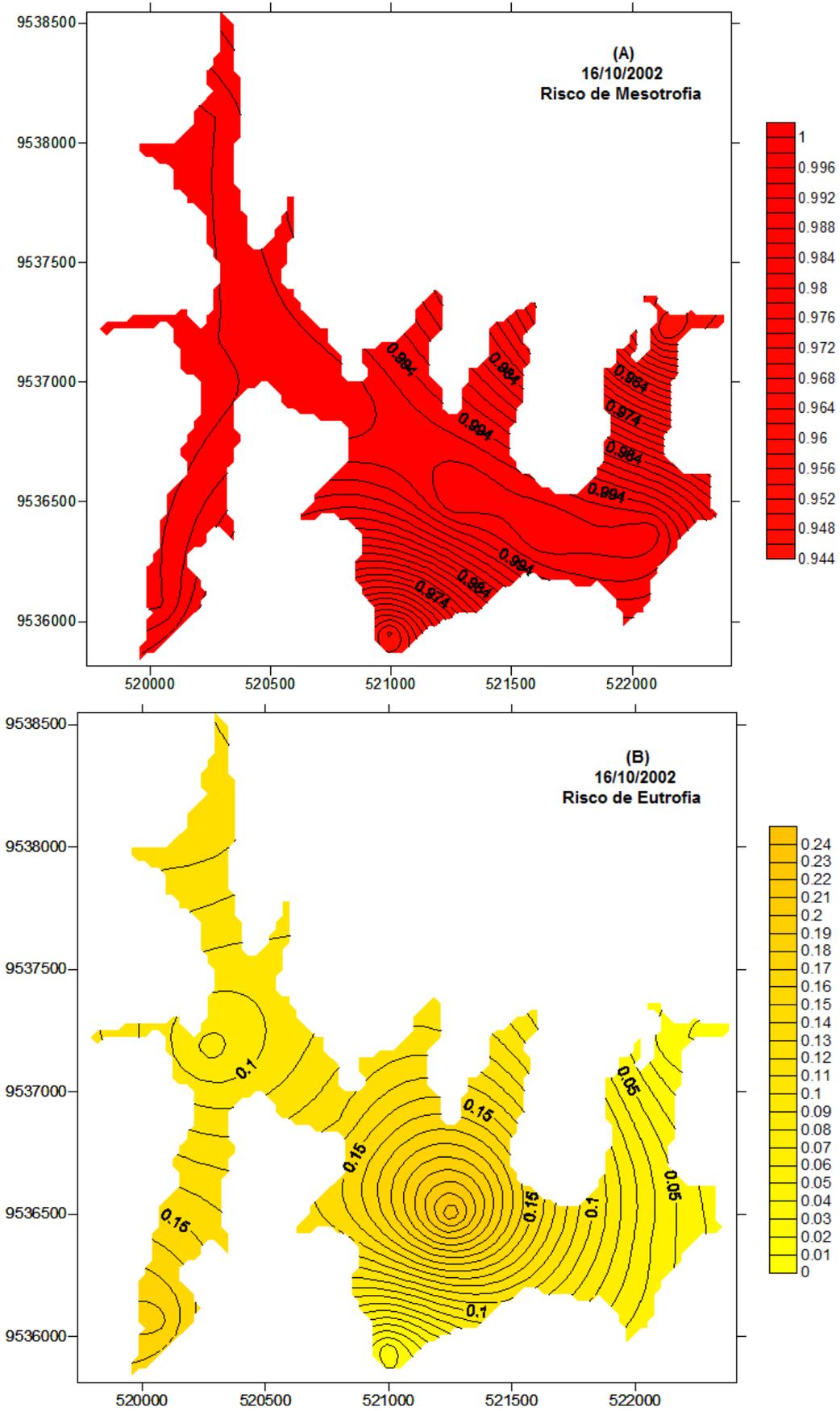


Figura 4.9 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de outubro do ano de 2002. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.

De acordo com o resultado da Figura 4.10 percebe-se que o mês de novembro de 2002 foi o mês crítico para a qualidade das águas desse reservatório, onde praticamente em toda a sua extensão o risco de eutrofização calculado variou entre 80% e 98%. Somente nas proximidades da barragem que esse risco diminuiu para um nível de 45% mais que ainda é muito alto para os padrões de qualidade. Este resultado mostra que neste mês de novembro o IET calculado apresentou valores elevados. Esses valores se mantiveram durante o mês de dezembro de 2002, atingindo valores de 99%, como pode ser observado através da Figura 4.11.

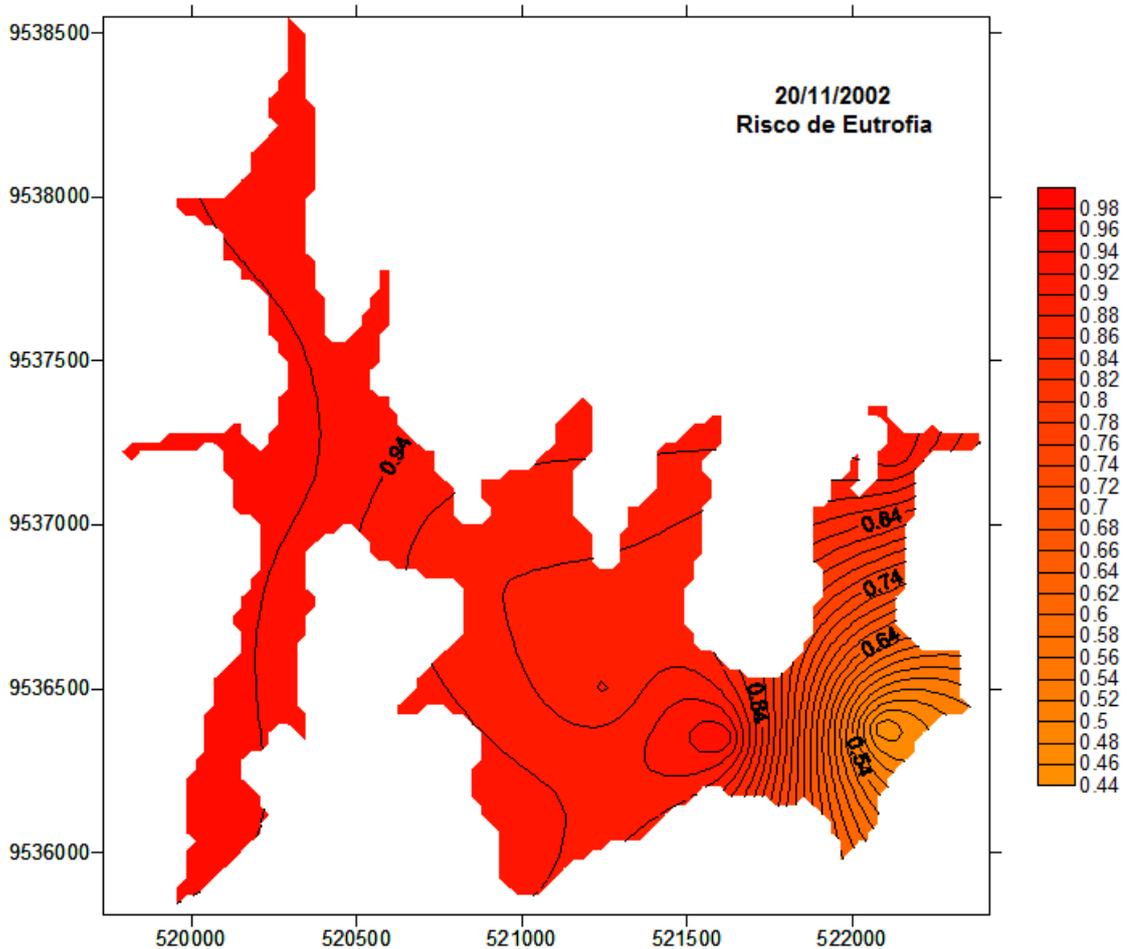


Figura 4.10 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio em novembro de 2002.

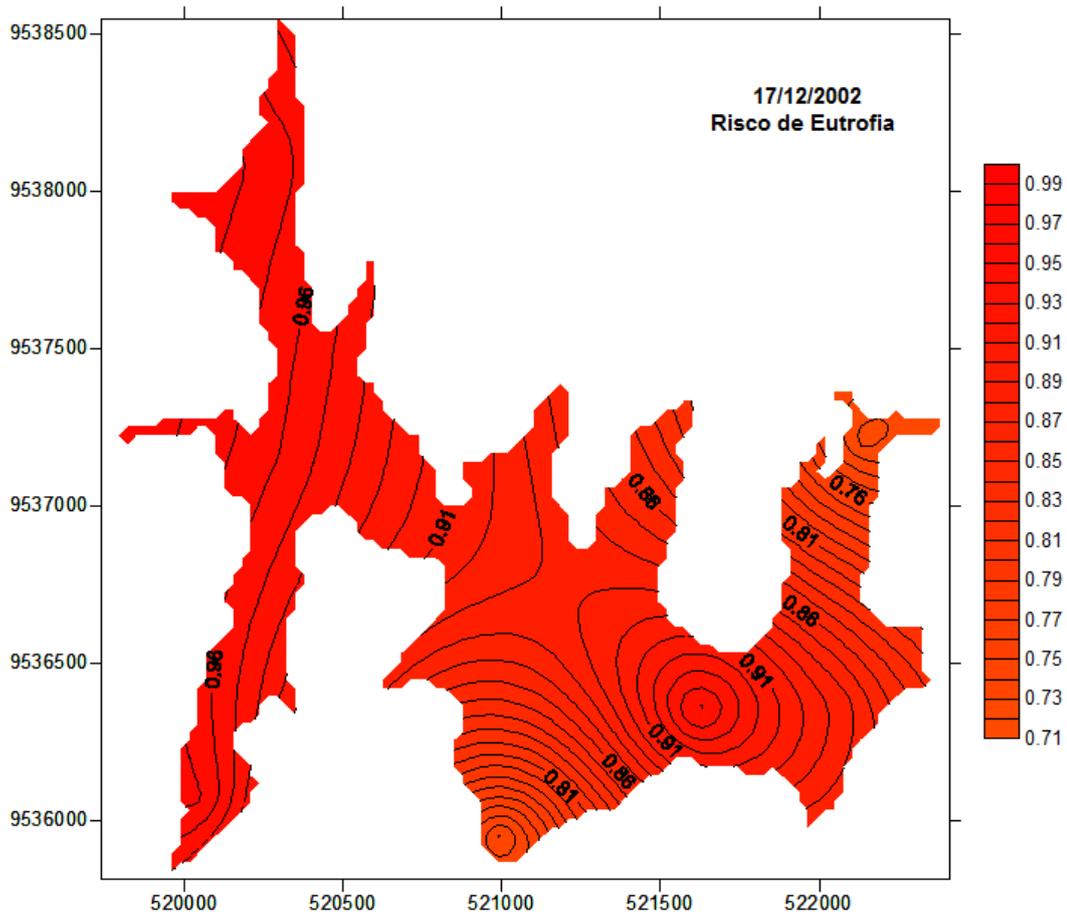


Figura 4.11 – Distribuição do Risco de Eutrofia para o Reservatório Acarape do Meio em dezembro de 2002.

Para o ano de 2003 não foi possível a obtenção de dados para as diversas concentrações em análise em razão da COGERH não ter realizado nenhuma visita de campo no Reservatório Acarape do Meio. Para o ano de 2004 essas coletas voltaram a ser realizadas a partir de novembro, cujos resultados serão apresentados a seguir.

Pela Figura 4.12 (A), os resultados calculados determinam que os riscos de mesotrofia encontram-se no intervalo entre 0,42 e 0,98 o que mostra que as águas deste corpo hídrico estão em bom estado. Como pode ser observado na Figura 4.12 (B), o risco de eutrofização para este ano foi bem menor do que nos anos anteriores. Neste caso, o risco de eutrofização variou até um valor máximo de 7%, o que poderia ser um indicativo de que, neste ano, a qualidade das águas deste reservatório se encontra em um estado satisfatório.

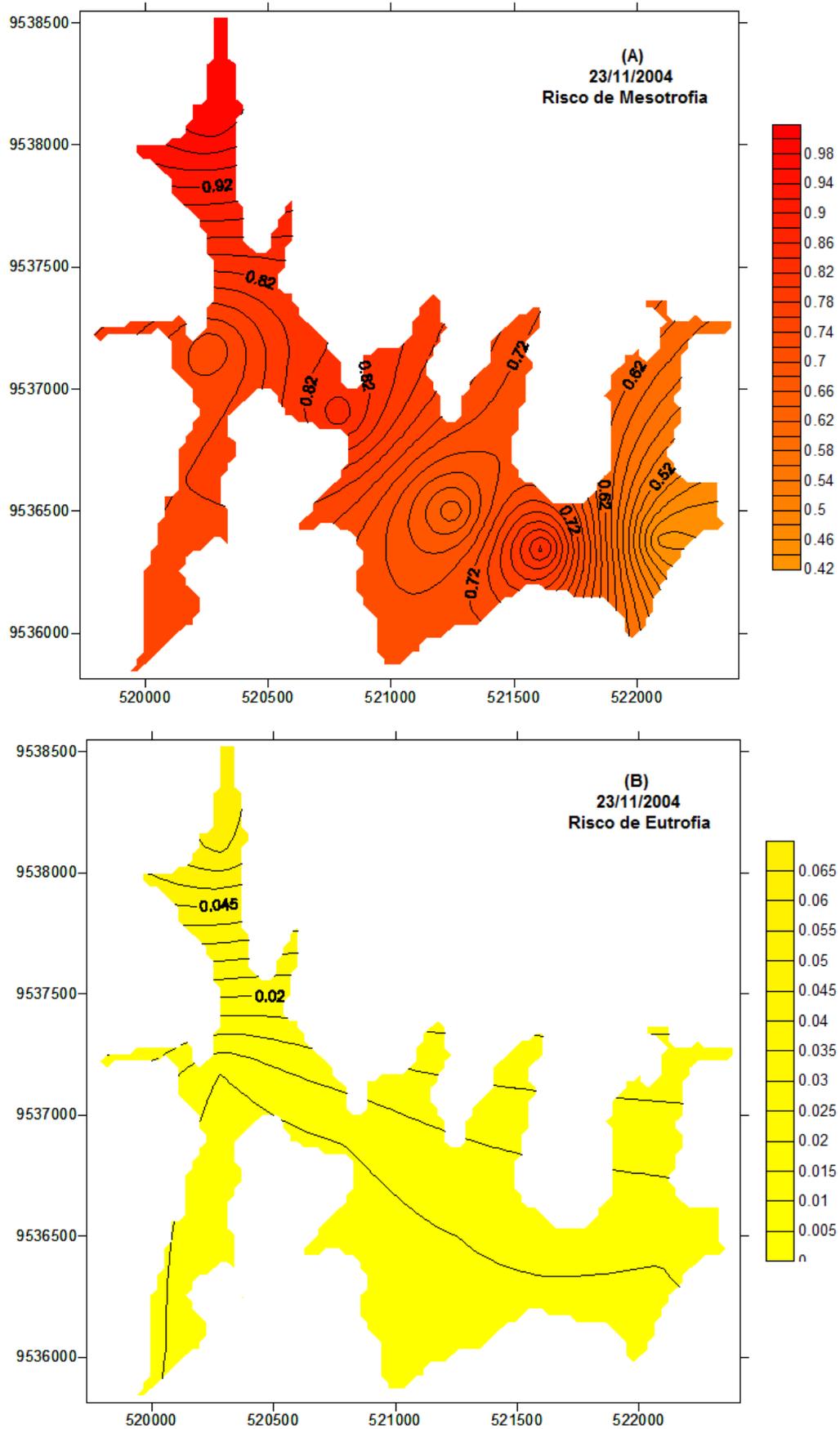


Figura 4.12 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de novembro do ano de 2004. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.

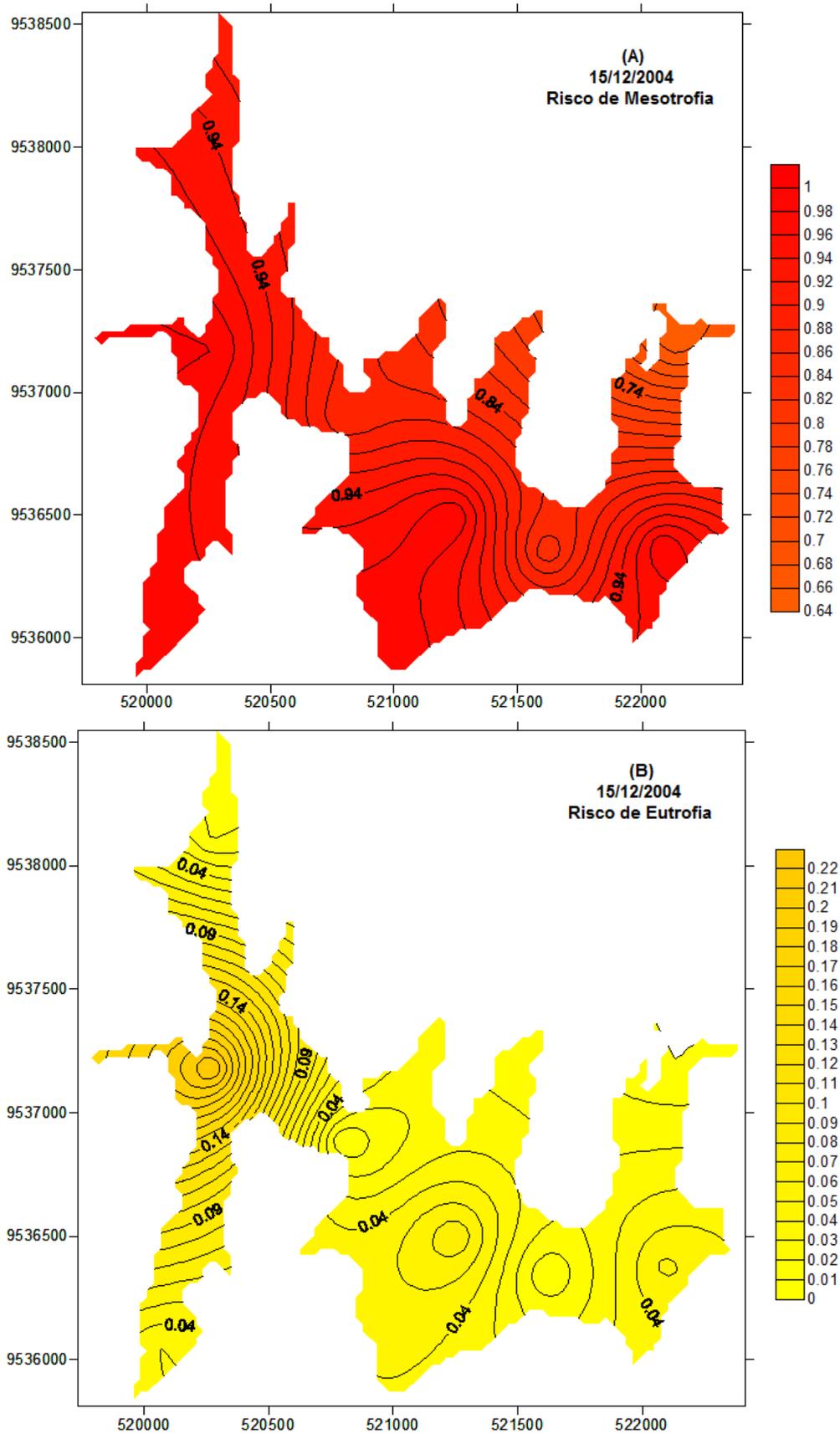
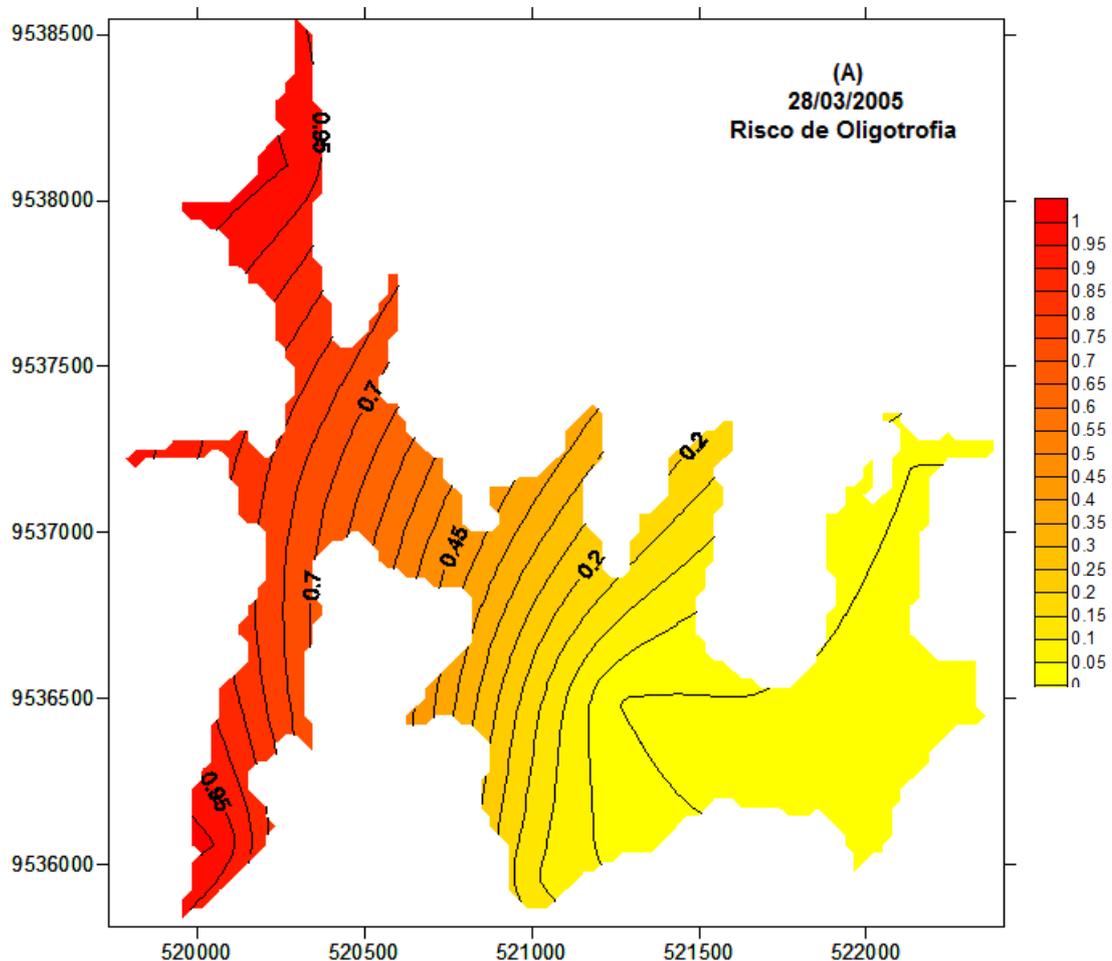


Figura 4.13 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de dezembro do ano de 2004. (A) Risco de Mesotrofia (B) Risco de Eutrofia.

Pela Figura 4.13 (A), os resultados calculados determinam que os riscos de mesotrofia encontram-se no intervalo entre 0,64 e 1,00. Este resultado mostra que, para este mês, as águas deste corpo hídrico continuam em bom estado. A Figura 4.13 (B) mostra que no mês de dezembro o risco de eutrofização continua baixo, tendo seus valores variando, somente, até 22%. Entretanto, deve ficar claro que estes valores já são maiores do que os resultados para o mês anterior, principalmente na região de entrada do reservatório.

A Figura 4.14 (A) mostra que neste caso, é possível ver que o risco do reservatório ficar oligotrófico continua dentro de uma expectativa razoável, pois o risco variou entre 1% e 100%, o que mostra uma instabilidade ao longo de todo o reservatório. Como pode ser observada pelos resultados, esta metodologia pode ser mais bem aplicada quando se tem bancos de dados, para períodos mais longos. Entretanto, os resultados mostram que, neste mês, há uma entrada significativa de nutrientes no reservatório, proveniente dos rios a montante do mesmo. A Figura 4.14 (B) confirma esses resultados.



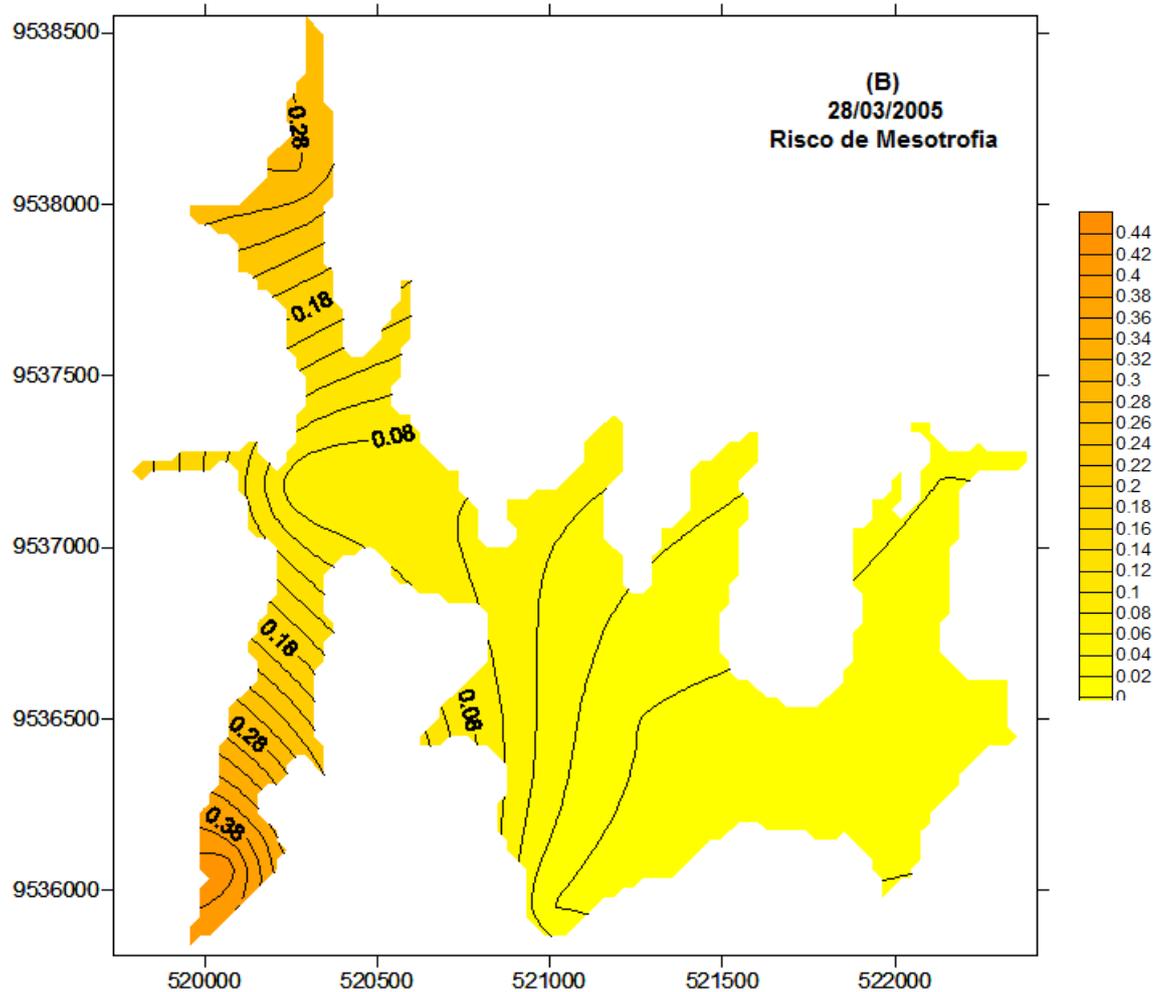


Figura 4.14 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de março do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.

A Figura 4.15 (A) mostra o risco de oligotrofia para maio de 2005. Como pode ser observado, não há grandes mudanças para o risco neste período, mostrando, assim, na estação chuvosa de 2005, a água do reservatório tinha boa qualidade, com baixo risco de eutrofização e/ou de hipereutrofização. A Figura 4.15 (B) confirma esta afirmação, considerando que a mesma mostra a distribuição do risco de mesotrofização para o mês de maio.

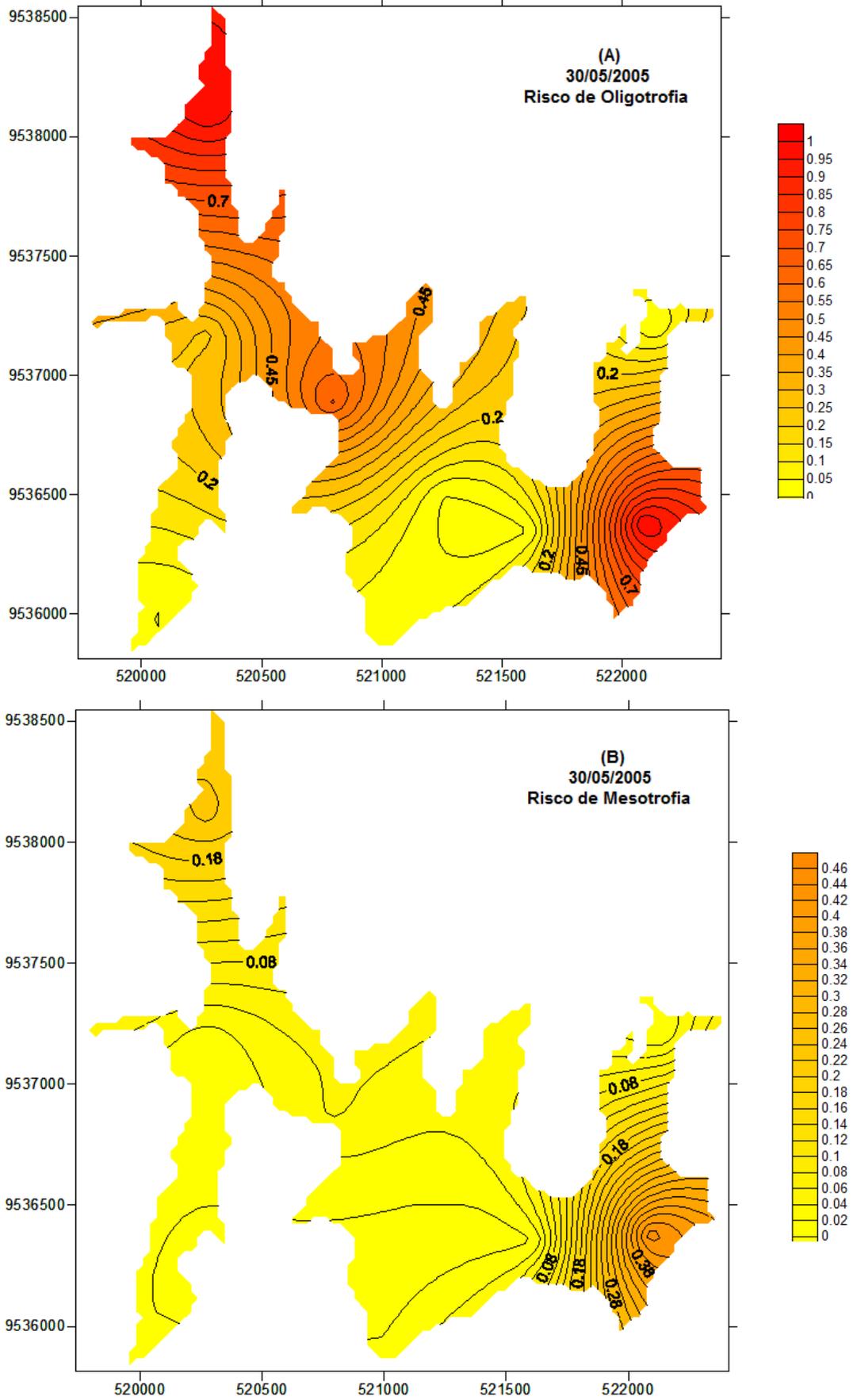


Figura 4.15 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.

A Figura 4.16 (A) e (B) mostra que em julho, o índice de estado trófico ainda é baixo, mas começam a aparecer alguns pontos onde a qualidade já não é tão boa como antes. Entretanto pode-se dizer que o ano de 2005 foi um ano de boa qualidade de água para o reservatório em questão. A Figura 4.17 comprova esta conclusão.

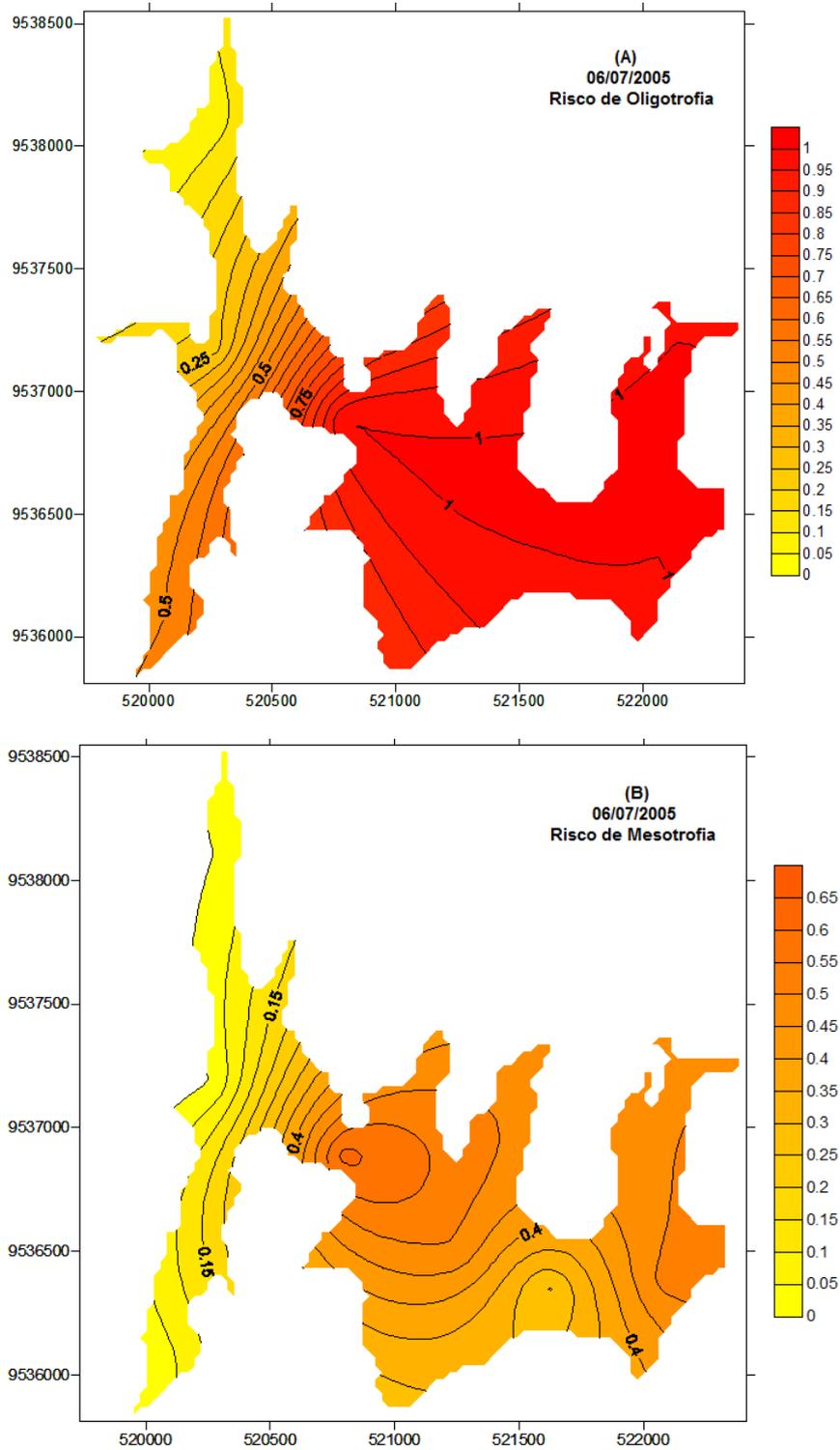


Figura 4.16 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de julho do ano de 2005. (A) Risco de Oligotrofia (B) Risco de Mesotrofia.

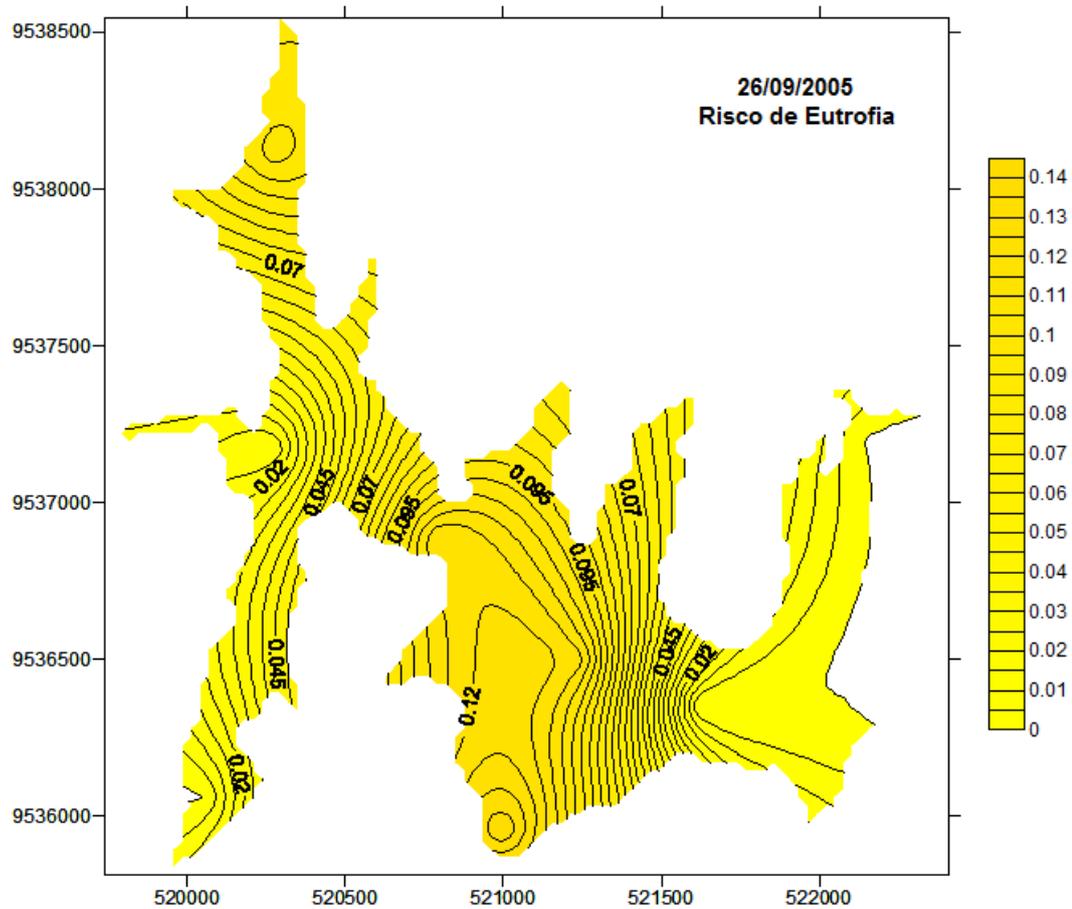


Figura 4.17 – Distribuição do risco de eutrofização para o reservatório Acarape do Meio em setembro de 2005.

A Figura 4.18 (A) mostra os resultados para o risco de eutrofização para o mês de maio de 2006. Como podem ser observados, os resultados mostram um estado trófico bastante comprometido para as águas deste reservatório. Neste caso, o risco de eutrofização se encontra muito próximo de 98% para as regiões próximas da barragem. Este resultado mostra um estado onde o índice de estado trófico é alto para os padrões de reservatórios de abastecimento. A Figura 4.18 (B) comprova as análises anteriores, onde o risco de hipereutrofização é representado para o mês de maio de 2006.

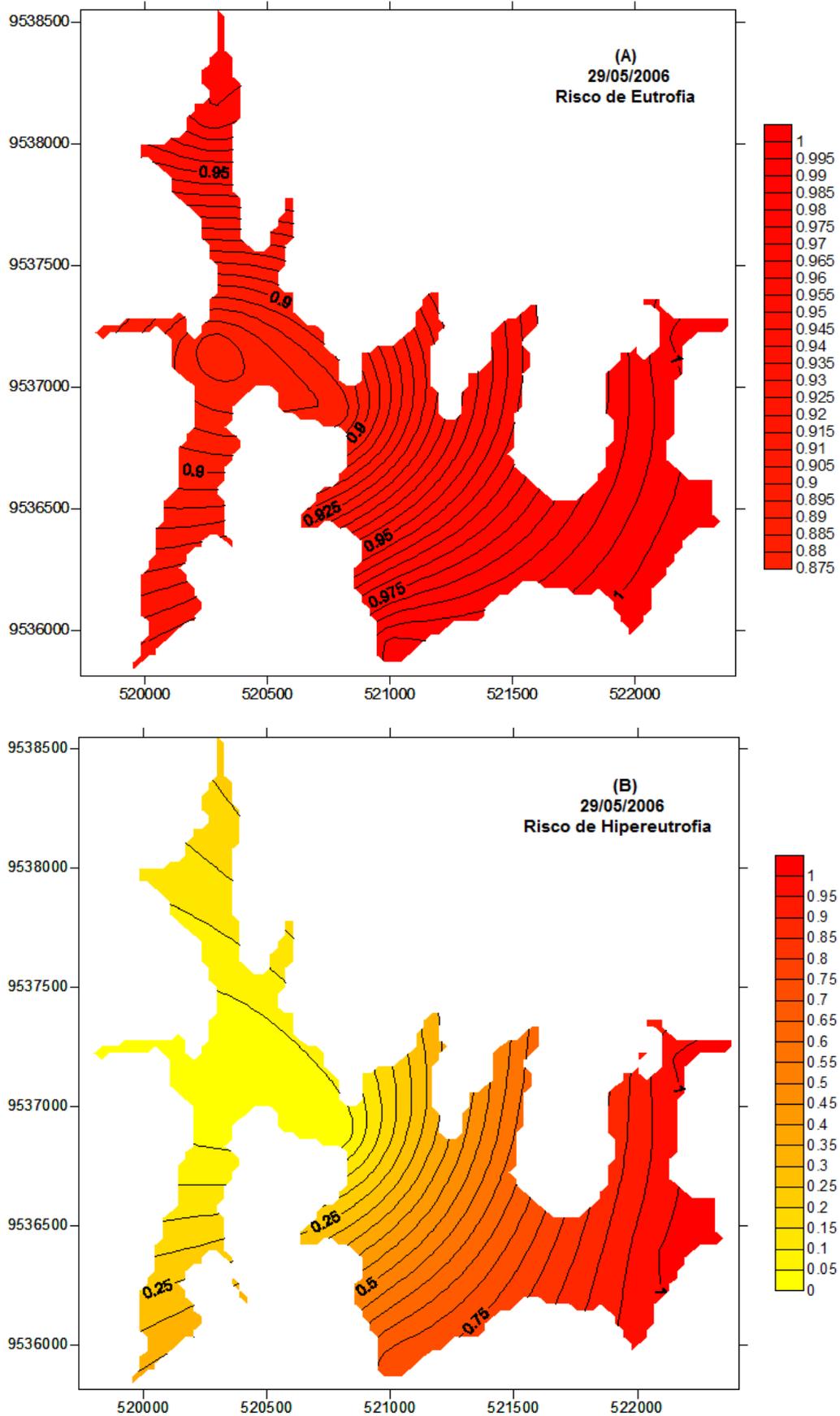


Figura 4.18 – Diferentes riscos para o reservatório Acarape do Meio, no mês de maio do ano de 2006. (A) Risco de Eutrofia (B) Risco de Hipereutrofia.

Estes resultados serviram para mostrar a capacidade da metodologia proposta na determinação do risco de eutrofização dos reservatórios. A presença da Teoria *Fuzzy* no cálculo do Índice de Estado Trófico, transformando este índice em de funções de pertinências para o índice de estado trófico, permite que o risco *fuzzy* possa ser calculado para diferentes cenários. Com isso, espera-se que seja possível estabelecer um melhor controle para os processos de operação e gestão desses reservatórios.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Após a análise dos resultados para os campos de risco de eutrofização das águas do Reservatório Acarape do Meio, foi possível tirar algumas conclusões pertinentes a este processo.

- A metodologia proposta, com base na Teoria *Fuzzy*, aplicada nos cálculos do Índice de Estado Trófico Modificado (IET_M), mostrou-se eficiente na determinação do risco de eutrofização para os diversos pontos de coleta do Reservatório Acarape do Meio;
- Os resultados mostram que, segundo esta metodologia, é possível se valor da Teoria *Fuzzy* e, assim, fazer uma avaliação ambiental de um reservatório, com uma base de dados pouco representativa dentro de uma série histórica;
- Os resultados mostraram que o risco varia de ponto para ponto dentro do reservatório, e em diferentes estações do ano. Este resultado permite dizer que, a hipótese de que os reservatórios podem ser representados como sistemas concentrados, só é adequado em uma primeira análise. Em uma verificação mais precisa, as águas dos reservatórios possuem gradientes de concentração tanto nas direções longitudinal como transversal, mesmo para uma análise bidimensional horizontal;
- No período de análise, os riscos de eutrofização e de hipereutrofização deram muito altos, próximo de 90%, o que comprova a tese de que em algumas estações do ano, há uma convergência maior de fatores que favorecem o processo de eutrofização. Esses fatores podem ser destacados como: aporte de nutrientes em excesso, processo de evaporação, irregularidades nos processos hidrológicos e um uso inadequado do solo nas fronteiras do reservatório;

- A pesquisa mostrou que o risco de eutrofização é dinâmico no tempo e no espaço. Ou seja, o processo de eutrofização pode se acentuar em um período e desacelerar em outro, fazendo com que as águas daquele corpo hídrico se recuperem rapidamente. Isto foi verificado no mês de maio de 2006 onde o risco de eutrofização ficou em média de 90% em toda a extensão do reservatório;
- Finalmente, os resultados mostraram que o Reservatório Acarape do Meio recebe muitas concentrações de nutrientes provenientes de tributários que se encontram a montante do mesmo. Isto é explicado considerando que a montante deste reservatório podem ser encontradas algumas cidades, como é o exemplo de Pacoti, que lançam seus efluentes diretamente neste rio, causando, assim, um aumento considerável no aporte de nutrientes para o reservatório.

6.2 Recomendações

Como esta metodologia se encontra em fase inicial de estudo, é recomentado que novas pesquisas sejam desenvolvidas com o propósito de que algumas respostas possam ser obtidas. Assim, recomenda-se:

- Que no cálculo do Índice de Estado Trófico Modificado, novas substâncias sejam incorporadas no processo, de modo que o referido índice possa ser mais representativo e, dando assim uma melhor legitimidade para os valores dos campos de risco;
- Que novos indicadores de qualidade de água possam ser usados na metodologia proposta para se ter uma ideia de como o risco se comporta para diferentes processos de avaliação;
- Finalmente que novos reservatórios possam ser usados, de forma a se criar uma generalização mais consistente das aplicações desta metodologia em escala regional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, M. P.; WASSEM, S.; BAI, R. V; MOHSIN, I. Development of New Water Quality Model Using Fuzzy Logic System for Malasia. **Open Environmental Sciences**; 2, 101 – 106; 2008.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos, Brasília, 176p, 2005.

BERNHARDT, H. Reservoir and Drinking-water Supply - a Global Perspective. **Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua**, v. 44, Supply 1:2 – 17, 1995.

BRANCO, S. M. et al.; LA LAINA, R. P. (org): **Hidrologia Ambiental**, Editora da Universidade Federal de São Paulo, ABRH, v.3, 1991.

CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ. Abastecimento Integrado de Água da Região Metropolitana de Fortaleza. Disponível em: http://www.cagece.com.br/abastecimento_agua_RMF.asp. Acesso em: 16/02/2011.

CALIJURI, M.C., **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização**. Tese de doutorado. Departamento de Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 292 p., 1988.

CARLSON, R. E. A Trophic State Index for Lakes. **Limnology and Oceanography**. v.22 (2), p.361-369, 1977.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano Estadual dos Recursos Hídricos**. Fortaleza, SRH, 4v., 1992.

CEBALLOS, B. S. O. **Utilização de indicadores microbiológicos na tipologia de ecossistemas aquáticos do trópico semi-árido**. Tese de Doutorado. Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 192 p., 1995.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, Proposta de Índices de Qualidade de Água para o Estado de São Paulo. Coletânea de Textos da CETESB, 2002.

CHANG, N.B.; CHEN, H.; NING, S. **Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach**, J. Environ Manag, 63: 293 – 305, 2001.

CHAPMAN, C.; WARD, S. **Project risk management: processes, techniques and insights**. Nova York: Wiley, 1997.

CHAPRA, S. C.; TARAPCHAK, S. J. Chlorophyll-a Model and its Relationship to Phosphorus Loading Plots for Lakes. **Water Resources Research**, vol.12/6, p.1260 – 1264, 1976.

CHAPRA, S.C. **Surface Water Quality Modeling**, Mc-Graw Hill Int, 1997.

COGERH - COMPANHIA DE GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS. Disponível em: www.cogerh.com.br. Acesso em: 02/02/2011.

DATSENKO, I. S. **Estudo da Qualidade da Água dos Reservatórios do Estado do Ceará**. Relatório não Publicado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.

DUARTE, M. A. C. et al. Utilização dos Índices do estado Trófico (IET) e de Qualidade de Água (IQA), na Caracterização Limnológica e Sanitária das Lagoas do Bonfim, Extremóz e Jiqui (RN) - Análise Preliminar; **Anais do IXX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental: resumo dos trabalhos técnicos**, Foz do Iguaçu, 1997.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications**. Academic Press, New York, 393 pp., 1980.

DUQUE, W.O.; HUGUET, N.E.; DOMINGO, J. L.; SCHUHMACHER, M. **Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study** 2006; 32: 733-42.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro, Interciência /FINEP, 620p., 1988.

FREIRE, R. H. F. **Aspectos Limnológicos de Três reservatórios que Abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza – Açudes Pacajus, Pacoti e Gavião**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 290 p., 2000.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: probabilities and fuzzy sets.** New York: VCH, 1994.

GERALDES, A. M.; BOAVIDA, M. J. Limnological Comparison of a New Reservoir with One Almost 40 Years Old Which Had Been Totally Empty and Refilled. **Lakes and Reservoirs; Research and Management**, n.4, p.15-22, 1999.

HAYDÉE, T. O. **Aplicação de índices de Estado Tróficos e de Qualidade de Água na Avaliação da Qualidade Ambiental de um Reservatório Artificial (Reservatório de Barra Bonita, Estado de São Paulo, Brasil);** AIDIS – ASSOCIAÇÃO INTERAMERICANA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1995.

KAUFMANN, A. and GUPTA, M.M. **Introduction of Fuzzy Arithmetic: Theory and Applications.** Van Nostrand Reinhold, New York, 351 pp., 1985.

KAUFMANN, A. and GUPTA, M.M. **Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science.** North Holland, Amsterdam, 338 pp., 1988.

LIND, O. T.; TERRELL, T. T.; KIMMEL, B. L. Problems in Reservoir Tropic-state Classification and Implications for Reservoir Management. In: SRASKABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. (eds). **Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management**, Kluwer Academic Publishers Group, Boston, p.57-67, 1993.

MCKONE, T. E. **Can Fuzzy Logic Bring Complex Environmental Problems into Focus?** Environ Sci Technol, 2005; 39 (2): 42 A - 47 A.

MCNEIL, F.M.; THRO, E. **Fuzzy Logic a Pratical Approach.** AP Professional, Boston, U.S.A., 1994.

MOLAK, V. ED. **Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management**, CRC Press, New York, U.S.A., 1997.

MOTA, S. **Introdução à Engenharia Ambiental.** Rio de Janeiro; ABES, 1997.

NAGELS, J.W.; COLLEY, D.; SMITH, D.G. A water quality index for contact recreation in New Zealand. **Water Sci Technol**; 43 (5): 285-92; 2001.

NOVOTNY, V.; OLEM, H. **Water Quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution.** Van Nostrand Reinhold Company, New York, NY, 1994.

NYGARD, G., Hydrobiological studies of some Danish Ponds and Lakes II: The quotient hypothesis and some new of little known phytoplankton organisms, Kongel. Danske Videns. Selskab. Biol. Skrifter, 7, 1:1-293, 1949.

ODUM, E. P. **Fundamentals of Ecology**. W. B. Saunders, Philadelphia. 1971.

OECD - Organization for Economic Co-Operation and Development. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Cooperative Programme on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control). Paris, 156p, 1982.

PINTO, M. T.; CAVALCANTI, C. G.; LUDUVICE, M. A Evolução do Processo de Eutrofização do Lago Paranoá – Brasília, Após Cinco Anos de Controle nas Descargas de Nutrientes. **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, p. 2325-2336, maio 1999.

RAFTERY, J. **Risk Analysis in Project Management**, E & FN SPON, London, U.K., 1994.

RAST, W.; LEE, G. F. Summary Analysis of the North American (US Portion) OECD Eutrophication **Project: Nutrient Loading** – Lake Response Relationships and Trophic State Indices. Serie EPA-600-3-78-008, 1978.

RIBEIRO, I. V. A. S. **Estudo do Estado Trófico do Reservatório Acarape do Meio mediante a determinação de indicadores de qualidade de água**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

ROCHA, A. A. **Algae as Biological Indicators of Water Pollution**. In: Cordeiro Marino M. et al. *Algae and Environmental: a General Approach*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Ficologia, 131p., 1992.

SAKAMOTO, M. Primary Production by Phytoplankton Communities in Some Japanese Lakes and Its Dependence on Lake Depth. **Archives of Hydrobiology**: 62, p.1-28, 1966.

SALLAS, H.J. and MARTINO, P. A simplified phosphorus trophic state model for warm water tropical lakes. **Water Research**, v. 25, N^o 3, p.341-350, 1991.

SHRESTA, B.P.; REDDY, K.R; DUCKSTEIN, L. Fuzzy reliability in hydraulics. In: **Proc. First Int. Symp. on Uncertainty Mod. and Analysis**, Univ. of Maryland, College Park, 1990.

SRH-CE - SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ. Plano de Gerenciamento de Águas das Bacias Metropolitanas, 2001.

STOCKNER, J. G. Preliminary Characterization of Lakes in the Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario, Using Diatom Occurrences in Sediments. **Journal Fisheries Research Board of Canada**, v.28, p.265-275, 1971.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**, Harper & Row, Publishers, N. York, 1987.

TOLEDO, A.P.; AGUDO, E.G.; TOLARICO, M.; CHINEZ, S.J., A Aplicação de Modelos Simplificados para a Avaliação do Processo de Eutrofização em Lagos e Reservatórios Tropicais; **Anais do XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental** – AIDIS, Santiago do Chile, 1984.

TUNDISI, J. G. & TUNDISI-MATSUMURA, T. **The Lobo-Broa Ecosystem Research**. In: Limnology in Brazil, Brazilian Academy of Sciences, p.219-244, 1995.

TUNDISI, J. G. **Planejamento e Gerenciamento de Lagos e Reservatórios: Uma Abordagem Integrada ao Problema da Eutrofização**. São Carlos. RIMA. ISBN 92-807-2129-1. Série de Publicações Técnicas [11P], 2001.

US-EPA, Protocol for Developing Nutrient TMDLs (First Edition), 1999.

US-EPA/NES - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY/ NATIONAL EUTROPHICATION SURVEY. The Relationships of Phosphorus and Nitrogen to Trophic State of Northeast and North-Central Lakes and Reservoirs. NES Working Paper N°. 23, Corvallis, Oregon, 1974.

VIEIRA, V.P.P.B. **Análise de Riscos em Recursos Hídricos** – Fundamentos e Aplicações. Coleção ABRH 10. Porto Alegre – RS, 2005.

VOLLENWEIDER, R. A. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. **Report OECD**. DAS/CSI/68.27. Paris, 165p., 1968.

VOLLENWEIDER, R. A. **Eutrophication**. Notes Distributed During the II Meeting of the Regional Project on Eutrophication of Tropical Lakes, 1983.

VOLLENWEIDER, R. A. & KEREEKES, J. J. Background and summary results of the OECD cooperative program on eutrophication. **International Symposium on Inland Waters and Lake Restoration**. EPA 440/5-81-010. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1980.

VOLLENWEIDER, R. A. & KEREEKES, J.J. Environment Canada. Background and Summary Results of the OECD Cooperative Program on Eutrophication. In Restoration of lakes and inland waters. **Int. Symp. on Inland Waters and Lake Restoration**. Sept. 8-12, 1981. Portland, Maine, EPA440/5-81-110, p.25-36, 1981.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Editora do Departamento de Engenharia Sanitária, UFMG, 243 p., 1995.

VON SPERLING. E. Mechanisms of eutrophication in tropical lakes. **Environmental Pollution**, ICEP-3, p.434-439, 1996.

VON SPERLING, M. **Morfologia de Lagos e Represas**, DESA/UFMG, Belo Horizonte, MG, 137p., 1999.

VON SPERLING. E.; DANTAS, A. P. Gerenciamento de Reservatórios de Abastecimento de Água: Influência de Fatores Físicos na Determinação do Grau de Trofia. **Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Porto Alegre, Ref. II-018, 2000.

WETZEL, R. G. **Limnology**. Saunders. Philadelphia, 743p., 1975.

WETZEL, R. G. **Limnologia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 919p., 1993.

ZADEH, L.A. **Fuzzy sets**. *Inform. Contr.* 8: 338-353, 1965.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Set Theory and its Application**. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 363 pp., 1985.