VIRGINIA CLEIRE RIBEIRO PIMENTEL

**ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

v.1

São Paulo
2004

VIRGINIA CLEIRE RIBEIRO PIMENTEL

Enga. Civil, Escola de Engenharia de São Carlos – USP – 1975

**ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica.

Orientador: PROF. DR. Giorgio
Brighetti – Professor do Departamento
de Engenharia Hidráulica e Sanitária da
EPUSP.

São Paulo
2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Pimentel, Virginia Cleire Ribeiro

**Alternativas de solução para os impactos físicos de
barragens / V.C.R. Pimentel. - São Paulo, 2004.**

2v.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.**

**1.Reservatórios 2.Impactos ambientais I. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Hidráulica e Sanitária II.t.**

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, José Francisco (Juca), que não está mais aqui para comemorar e se orgulhar da conclusão desse curso, à minha mãe Cleide, pelo constante exemplo de trabalho, coragem e determinação, aos meus filhos Sérgio, Marcelo e Fernando pela compreensão e paciência nesses quatro anos. Ao Sérgio Cifú...

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Corpo Docente do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelos ensinamentos durante o curso de pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof Dr. Giorgio Brighetti, pelas aulas, contribuições e incentivos constantes e dedicados.

À Dra. Mônica Ferreira do Amaral Porto, pelos ensinamentos e contribuições à essa Dissertação.

Ao Dr. Carlos Lloret Ramos, pelas valiosas sugestões formuladas e incorporadas à versão definitiva desse trabalho.

Ao Eng^o Pedro Diego Jensen que, com seu bom senso e experiência prática no assunto, atenciosamente contribuiu para a melhoria da forma e do conteúdo dos textos.

Aos meus amigos da THEMAG, que me ajudaram de todas as formas, incentivando, esclarecendo dúvidas, fornecendo bibliografia, colaborando nas artes gráficas, meu maior agradecimento. Em especial aos Geólogos Luiz Ferreira Vaz e Marilda Tressoldi, à Economista Sara Lia Werdesheim, aos Eng^{os} José Roberto dos Santos Vieira e Sidney Lázaro Martins, ao Carmelo Sansone, Raimundo Nonato Bezerra Cutrim e Wanderson Gotardo Paulino.

E, por fim, agradeço à Pati, Patricia Cazol – sem a qual essa Dissertação não seria a mesma – tanto pelo apoio técnico, quanto e, principalmente, pela amizade e convívio carinhoso ao longo de todos esses anos.

RESUMO

O presente trabalho de Dissertação reúne os impactos no meio físico decorrentes da implantação de reservatórios e sugestões de medidas para evitar ou minimizar esses impactos. Alguns assuntos foram desenvolvidos com maior profundidade, dado o caráter polêmico ou sua importância atual. Outros foram tratados de forma mais superficial, por serem questões de caráter específico de cada local ou por serem impactos para os quais as alternativas ou as medidas de controle se resumem ao monitoramento ambiental. Esses temas são precedidos, na Dissertação, por um panorama global sobre grandes barragens, seus usos predominantes por região e no Brasil, e a demanda de água no mundo. Apresenta-se a seguir uma síntese da evolução histórica da utilização de instrumentos de avaliação de impactos no meio ambiente e os métodos usualmente adotados nesses estudos. E, por fim, são listadas algumas alternativas à construção de barragens, para obtenção de água e energia, e mencionados os aspectos técnicos e ambientais a elas associados.

ABSTRACT

This Dissertation aims the presentation of a general analysis of the environmental impacts, specially those related to the physical realm, arised from the construction of dams and the creation of reservoirs, and also the suggestion of a series of measures to be implemented in order to avoid or to mitigate those impacts. Some of the subjects have been developed in detail, owing to their recent increasing importance and controversial nature. Others have been treated superficially, due to their specific local nature or even because the related mitigation measures would be restricted to a mere environmental monitoring. A previous approach is provided, relating dam projects and water demands around the world, and main reservoir purposes, by regions and in Brazil. Then, a synthesis of environmental assessment tools historical evolution and frequently used methods for that purpose are presented. Finally, it is presented a group of alternative structural measures that could supersede reservoir creation for the purposes of water and energy supply, together with a discussion of related technical and environmental issues.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

VOLUME 1

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – GENERALIDADES.....	5
2.1 – Barragens.....	5
2.1.1 – Demanda d'Água no Mundo.....	5
2.1.2 – Demanda de Energia no Mundo.....	10
2.2 – Barragens no Século XX.....	19
2.3 – Usos Predominantes das Barragens por Região.....	23
2.3.1 – Barragens para Irrigação.....	26
2.3.2 – Barragens para Abastecimento Doméstico e Industrial.....	27
2.3.3 – Barragens para Geração de Energia.....	28
2.3.4 – Barragens para Proteção contra Enchentes.....	28
2.4 – Atributos Físicos das Grandes Barragens.....	29
2.5 – Barragens no Brasil.....	30
2.5.1 – Geração Hidrelétrica.....	30
2.5.2 – Irrigação.....	35
2.5.3 – Abastecimento de Água.....	36
2.5.4 – Controle de Cheias.....	37
2.6 – Comentários.....	37
CAPÍTULO 3 – IMPACTOS DE BARRAGENS.....	38
3.1 – Antecedentes.....	38
3.2 – Conseqüências da Construção de Barragens.....	44
3.3 – Classificação dos Impactos.....	50
3.4 – Ações Geradoras de Impactos.....	53

3.5 – Fontes Alternativas de Água e Energia.....	54
3.5.1 – Abastecimento de Água ou Irrigação por Captação do Lençol Subterrâneo	54
3.5.2 – Energia Solar	56
3.5.3 – Biomassa	56
3.5.4 – Energia Eólica	57
3.5.5 – Petróleo.....	57
3.5.6 – Carvão Mineral	58
3.5.7 – Gás Natural.....	59
3.5.8 – Energia Nuclear.....	59
3.5.9 – Energia das Águas Oceânicas	60
3.5.10 – Repotenciação das Usinas Existentes (Gestão da Oferta)	60
3.5.11 – Conservação de Energia (Gestão da Demanda)	60
3.5.12 – Comentários.....	61
CAPÍTULO 4 – IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS.....	63
4.1 – Estudos de Diagnóstico Ambiental	63
4.1.1 – Clima	63
4.1.2 – Recursos Hídricos	64
4.1.3 – Geologia.....	64
4.1.4 – Geomorfologia	65
4.1.5 – Pedologia e Aptidão Agrícola.....	65
4.1.6 – Análise Integrada	65
4.2 – Avaliação dos Impactos no Meio Físico	65
4.2.1 – Identificação dos Impactos Ambientais	66
4.2.2 – Definição dos Fatores Ambientais	66
4.2.3 – Matriz de Interferências.....	71
4.3 – Avaliação dos Impactos	73
4.3.1 – Clima	73
4.3.1.1 – Alterações na Umidade do Ar, Ventos e Nevoeiro	73
4.3.1.2 – Gases de Efeito Estufa	75
4.3.1.3 – Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica.....	107
4.3.1.4 – Evaporações Líquidas nos Reservatórios de UHEs	108

4.3.2 – Recursos Hídricos	113
4.3.2.1 – Intensificação de Ondulações no Espelho d'Água	113
4.3.2.2 – Variação Diária do Nível d'Água do Rio a Jusante da Barragem.....	115
4.3.2.3 – Intensificação dos Processos de Assoreamento a Montante	117
4.3.2.4 – Elevação dos Níveis das Águas Subterrâneas com o Enchimento do Reservatório.....	147
4.3.2.5 – Variações dos Níveis das Águas Subterrâneas durante a Operação	166
4.3.3 – Terrenos	166
4.3.3.1 – Potencialização da Colapsividade de Solos e Expansividade de Solos e Rochas de Fundações	168
4.3.3.2 – Instabilizações e Erosões nas Encostas Marginais	169

VOLUME 2

4.3.3.3 – Sismicidade Induzida por Reservatórios	182
4.3.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados.....	203
4.3.3.5 – Interferências nos Depósitos de Areia e Cascalho	207
4.3.3.6 – Interferências nos Depósitos de Argila.....	208
4.3.3.7 – Alteração da Paisagem pela Formação do Reservatório.....	209
4.3.3.8 – Degradação da Paisagem pela Operação da Usina	209
4.3.3.9 – Degradação da Paisagem pela Execução de Movimentos de Terra e Rocha	210
4.3.4 – Limnologia	210
4.3.4.1 – Generalidades	211
4.3.4.2. – Lagos e Reservatórios	216
4.3.4.3 – Eutrofização de Reservatórios	218
4.3.4.4 – Estratificação Térmica de Reservatórios	235
4.3.4.5 – Comentários.....	263
4.4 – Hierarquia dos Impactos	265
4.4.1 – Metodologia	265
4.4.2 – Impactos Destacados como os Mais Relevantes	266

4.4.3 – Impactos Destacados como Relevantes	267
---	-----

CAPÍTULO 5 – POSSÍVEIS SOLUÇÕES E MEDIDAS PARA ATENUAR OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS.....	269
---	------------

5.1 – Fase de Planejamento – Estudo de Alternativas Locacionais para a Barragem	269
--	------------

5.2 – Possíveis Soluções e Medidas Aplicáveis.....	274
---	------------

5.2.1 – Clima	274
----------------------------	------------

5.2.1.1 – Monitoramento do Clima Local.....	274
--	------------

5.2.1.2 – Gases de Efeito Estufa	278
---	------------

5.2.2 – Recursos Hídricos	287
--	------------

5.2.2.1 – Monitoramento de Níveis d'Água a Jusante e a Montante da Barragem	287
--	------------

5.2.2.2 – Monitoramento Sedimentológico.....	290
---	------------

5.2.2.3 – Medidas para Controle do Assoreamento em Reservatórios	292
---	------------

5.2.2.4 – Medidas para Controle de Erosão a Jusante.....	295
---	------------

5.2.2.5 – Monitoramento Hidrogeológico.....	295
--	------------

5.2.2.6 – Medidas para o controle da elevação do lençol freático.....	303
--	------------

5.2.3 –Terrenos	305
------------------------------	------------

5.2.3.1 – Monitoramento e Estabilização de Encostas Marginais	305
--	------------

5.2.3.2 – Medidas para Estabilização de Encostas Marginais	312
---	------------

5.2.3.3 – Monitoramento Sismológico.....	316
---	------------

5.2.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados	319
--	------------

5.2.3.5 – Recomposição de Áreas Degradadas.....	320
--	------------

5.2.4 – Limnologia	322
---------------------------------	------------

5.2.4.1 – Monitoramento da Qualidade da Água	322
---	------------

5.2.4.2 – Medidas Aplicáveis	329
---	------------

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	345
LISTA DE REFERÊNCIAS	347
GLOSSÁRIO	356
ASPECTOS LEGAIS E INSTITUCIONAIS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Consumo Regional de Água Doce por Uso (1996)	7
Figura 2.1.2 – Demanda Média Anual de Água Doce per Capita (consumo próprio e demais usos: irrigação, industrial, doméstica e municipal).....	8
Figura 2.1.3 – Distribuição da Água no Mundo	9
Figura 2.1.4 - Países com Carência de Água.....	9
Figura 2.1.5 – PIB Mundial (em bilhões de dólares/97).....	11
Figura 2.1.6 – Crescimento do PIB por grupo (em % aa).....	11
Figura 2.1.7 – Oferta Interna de Energia (10 ⁶ tep)	12
Figura 2.1.8 – Intensidade Energética (tep/mil US\$).....	13
Figura 2.1.9 – Participação das Fontes de Energia na OIE	13
Figura 2.1.10 – Emissões de Dióxido de Carbono por Região (milhões de toneladas)...	14
Figura 2.1.11 – Demanda de Energia (milhões tep)	15
Figura 2.1.12 – Estrutura da OIE (%).....	16
Figura 2.1.13 – Oferta Interna de Energia (%).....	17
Figura 2.1.14 – OIE 2002, BRASIL	17
Figura 2.1.15 – OIE 2000, Mundo	17
Figura 2.1.16 – Consumo Final de Energia por Setor (milhões tep)	18
Figura 2.1.17 – Taxas Médias de Crescimento ao Ano (%)	18
Figura 2.2.1 – Distribuição Regional das Grandes Barragens em 2000.....	20
Figura 2.2.2 – Evolução no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX ...	21
Figura 2.2.3 – Evolução Acumulativa no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX.....	21
Figura 2.3.1 – Distribuição das Barragens Existentes por Uso nas Diversas Regiões ...	24
Figura 2.3.2 - Barragens de Hidrelétricas por Região	25
Figura 2.3.3 – Barragens para Irrigação por Região.....	25
Figura 2.3.4 – Barragens para Abastecimento por Região	26
Figura 2.3.5 – Barragens para Controle de Cheias por Região	26
Figura 2.3.6 – Terras Irrigadas a Partir de Barragens	27
Figura 2.4.1 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Altura	29
Figura 2.4.2 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Altura.....	29
Figura 2.4.3 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Área do Reservatório.....	30
Figura 2.4.4 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Área do Reservatório.....	30

Figura 2.4.5 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Volume do Reservatório.....	30
Figura 2.4.6 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Volume do Reservatório.....	30
Figura 2.5.1 – Usinas Hidrelétricas por Classe de Potência e Bacia Hidrográfica.....	32
Figura 2.5.2 – Maiores Reservatórios Brasileiros de Hidrelétricas.....	35
Figura 3.1.1 – Significado do Impacto Ambiental.....	39
Figura 3.1.2 – Conceito de Impacto Ambiental segundo Wathern.....	40
Figura 3.2.1 - Impactos Previstos e Imprevistos no Ecossistema.....	48
Figura 3.3.1 – Seqüência das Alterações Causadas pela Construção de Barragens em Rios.....	50
Figura 4.3.1 – Esquema Simplificado do Efeito Estufa	78
Figura 4.3.2 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais comparados com cultura de arroz e aterro sanitário	86
Figura 4.3.3 – Localização dos Reservatórios Estudados.....	92
Figura 4.3.4 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Bolhas.....	93
Figura 4.3.5. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Bolhas.....	94
Figura 4.3.6 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Difusão	94
Figura 4.3.7. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Difusão	95
Figura 4.3.8 – Emissões de Carbono de Usinas Termoelétricas e de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas Monitoradas.....	102
Figura 4.3.9 – Emissões de Carbono de Usinas Termoelétricas e de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas Monitoradas.....	103
Figura 4.3.10 – Emissões de CH₄ e CO₂ da UHE Tucuruí e de Térmica equivalente à óleo combustível.....	105
Figura 4.3.11 – Permanência do CH₄ e do CO₂ ao longo do tempo.....	105
Figura 4.3.12 – Forçamento Radiativo do CH₄ (E₄) e do CO₂ (E₂)	105
Figura 4.3.13 – Relação $R = E_4/E_2$	106
Figura 4.3.14 – Balanço Hídrico e Evaporação Líquida em Lajeado.....	109
Figura 4.3.15 – Modificação no Regime de Escoamento Anual devido à Barragem de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry, Estados Unidos.	116
Figura 4.3.16 – Flutuação Diária da Vazão Efluente devido à Operação de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry , Estados Unidos	116
Figura 4.3.17 – Bacia do Rio São Francisco – Linhas de Produção de Sedimentos.....	122
Figura 4.3.18 – Zoneamento Hidrossedimentológico Prévio do Brasil	124
Figura 4.3.19 – Efeitos de uma Barragem sobre o Transporte de Sedimentos	131
Figura 4.3.20 – Curvas de Eficiência de Retenção de Sedimentos em Reservatórios, Segundo Brune.	136

Figura 4.3.21 – Relacionamento entre os Fatores que Contribuem para o Equilíbrio Estável num Rio.....	141
Figura 4.3.22 – Camada de Armadura	142
Figura 4.3.23 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Hoover, no rio Colorado	144
Figura 4.3.24 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Parker, no rio Colorado	144
Figura 4.3.25 – Alteração da Cota de Fundo do rio Ratmau a Jusante do Vertedouro do Canal Ganga	146
Figura 4.3.26 – Degradação a Jusante da Barragem Vlotzlavski, rio Visla, após 4 anos do Fechamento da Barragem	147
Figura 4.3.27 – Modelo Esquemático da Evolução do Processo de Elevações Induzidas no Lençol Freático nas Bordas de Reservatório	148
Figura 4.3.28 – Mapa de Situação da Cidade de Pereira Barreto, em Relação aos Reservatórios existentes na Região.....	156
Figura 4.3.29 – Variação da Espessura da Lâmina d'Água ao longo do rio após o Barramento, segundo Seção Longitudinal à Borda do Reservatório	159
Figura 4.3.30 – Curvas de Distribuição da Elevação do Nível d'Água Subterrânea nas Vizinhanças de um Reservatório	162
Figura 4.3.31 – Processo Erosivo em Margens de Reservatórios.....	173
Figura 4.3.32 – Evolução do Processo Erosivo por Solapamento	174
Figura 4.3.33 – RESquema do Método para a Deter,minação do Ponto Extremo da Plataforma	175
Figura 4.3.34 - Reservatório da UHE Itaipu - Estações de Monitoramento dos Recuos de Margens	177
Figura 4.3.35 – Reservatório sobre um Lençol Freático Rebaixado	187
Figura 4.3.36 – Mapa do Histórico de Sismicidade na Região dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki.	193
Figura 4.3.37 – Registro do Número de Eventos Antes e Após o Enchimento dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki	194
Figura 4.3.38 – Histograma de Terremotos e Enchimento do Reservatório de Almendra	198
Figura 4.3.39 – Sismicidade Local e Enchimento do Reservatório de Almendra	199
Figura 4.3.40 – Salinização por Irrigação.....	205
Figura 4.3.41 – Porcentagem do Total de Terras Irrigadas Afetada por Sal	206
Figura 4.3.42 – Compartimentos de um Ecossistema Lacustre	216
Figura 4.3.43 – O Processo de Eutrofização	219
Figura 4.3.44 – Eutrofização Acelerada.....	221
Figura 4.3.45 – Conseqüências da Eutrofização no Sistema	222

Figura 4.3.46 – Eutrofização em Reservatórios Tropicais	229
Figura 4.3.47 – Perfil Vertical de Algumas Variáveis nos Reservatórios do Médio Tietê em 1998.....	232
Figura 4.3.48 – Razão de Redução de Variáveis Químicas dos Reservatórios, com Relação aos Valores Medidos no Rio Tietê.....	233
Figura 4.3.49 – Curva de Decaimento Exponencial da Luz Solar (A) e Perfil Vertical de Temperatura do Lago (B).....	237
Figura 4.3.50 – Perfil Vertical de Temperatura de Um Lago Estratificado	238
Figura 4.3.51 – Variação da Densidade da Água com a Temperatura	239
Figura 4.3.52 – Sequência de Perfis de Temperatura Observados Durante Um Ano, Num Lago de Região Temperada no Hemisfério Norte.....	240
Figura 4.3.53 – Variação do Regime de Mistura com a Localização do Lago.....	242
Figura 4.3.54 – Processo de Produção e Consumo de Oxigênio Num Lago Estratificado	245
Figura 4.3.55 – Exemplo de Perfis Verticais de Concentração de Oxigênio ao Longo do Tempo	245
Figura 4.3.56 – Representação Esquemática dos Principais Processos Atuantes em Reservatórios.....	248
Figura 4.3.57 – Principais Trocas Energéticas através da Interface Ar-Água.....	249
Figura 4.3.58 – Correntes de Densidade Advindas da Vazão Afluente.....	252
Figura 4.3.59 - Zonas de Influência da Vazão de Saída.....	253
Figura 4.3.60 – Distribuição de Velocidades para Reservatórios Não Estratificados (A) e Estratificados (B)	254
Figura 4.3.61 – Linhas de Fluxo na Saída do Reservatório.....	255
Figura 4.3.62 – Estratificação Térmica Vertical no Reservatório de Tucuruí	259
Figura 4.3.63 – Concentração de OD no Reservatório de Tucuruí	259
Figura 4.3.64 – Variação na Vazão Efluente do Reservatório de Tucuruí	260
Figura 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”	203
Figura 5.1.2 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”	204
Figura 5.2.1 – Perfil Esquemático para Instalação dos Monitores.....	299
Figura 5.2.2 – Implantação de Pinos e Estacas.....	310
Figura 5.2.3 – Substituição do Solo Fofa por Solo Compactado.....	312
Figura 5.2.4 – Construção de Brocas sob a Viga Baldrame.....	313
Figura 5.2.5 – Tratamento de Ruptura de Solos Expansíveis	313
Figura 5.2.6 – Contenção por Rip-rap	315
Figura 5.2.7 – Contenção por Gabiões Caixa	316
Figura 5.2.8 – Salinização por Irrigação e Formas de Controle.....	319

Figura 5.2.9 – Retirada Seletiva de Massas d'Água.....	332
Figura 5.2.10 – Aeração do Hipolímnio	333
Figura 5.2.11 – Aeração de Lagos Rasos por Meio de Mangueiras.....	334
Figura 5.2.12 – Remoção de Sedimentos por Sucção.....	334
Figura 5.2.13 – Oxidação Química dos Sedimentos	335
Figura 5.2.14 – Utilização de Peixes (Carpa Ou Tilápia) para Controle das Macrófitas.....	336
Figura 5.2.15 – Tomada d'Água com Comporta Adaptável ao NA	338
Figura 5.2.16 – Tomada d'Água com Viga Anti-vórtice.....	339
Figura 5.2.17 – Evolução da Camada Anóxica.....	341
Figura 5.2.18 – Evolução dos Teores de OD no Trecho a Jusante de Tucuruí.....	342

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Investimentos Anuais em Barragens na Década de 90.....	23
Tabela 2.3.1 – Características Gerais de Reservatórios de acordo com seu Uso Principal.....	24
Tabela 2.5.1 – Distribuição das UHEs Brasileiras por Faixa de Potência (jan/2002)	31
Tabela 2.5.2 – Maiores UHEs em Operação no Brasil em Jan/2002	33
Tabela 2.5.3 – Maiores Reservatórios de UHEs Brasileiras.....	34
Tabela 2.5.4 – Reservatórios para Irrigação	36
Tabela 2.5.5 – Reservatórios para Abastecimento de Água.....	36
Tabela 2.5.6 – Reservatórios para Controle de Cheias e Regularização.....	37
Tabela 3.1.1 – Características dos impactos ambientais	40
Tabela 3.1.2 – Atividades Modificadoras do Meio Ambiente sujeitas à Avaliação de Impacto Ambiental	41
Tabela 3.1.3 – Síntese e comparação de métodos de Avaliação de Impacto Ambiental	43
Tabela 4.2.1 – Exemplo de Matriz de Interferência.....	72
Tabela 4.3.1 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Clima.....	74
Tabela 4.3.2 – Índices de Concentração de Gases de Efeito Estufa.....	82
Tabela 4.3.3 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais e Outros	86
Tabela 4.3.4 – Características Físicas dos Reservatórios Tropicais que influenciam na Emissão de Gases de Efeito Estufa.....	88
Tabela 4.3.5 – Sinopse das Características dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados	91
Tabela 4.3.6 – Médias de Emissões das Campanhas.....	93
Tabela 4.3.7 – Hidrelétricas mais Poluentes	97
Tabela 4.3.8 – Eficiência das Hidrelétricas em Comparação com Termelétricas Virtuais de Potência Equivalente.....	99
Tabela 4.3.9 – Produção de Carbono Estimada Durante a Vida Útil dos Reservatórios	100
Tabela 4.3.10 – Evaporação Líquida para Usinas em Operação Segundo a Normal Climatológica 61-90	110
Tabela 4.3.11 – Evaporação Líquida para Usinas que Entrarão em Operação até 2005, segundo a Normal Climatológica 61-90	112
Tabela 4.3.12 – Evaporação Líquida para Usinas em Processo de Licitação, segundo a Normal Climatológica 61-90	112
Tabela 4.3.13 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Recursos Hídricos	114

Tabela 4.3.14 – Produção de Sedimentos em Suspensão dos Maiores Rios do Mundo	120
Tabela 4.3.15 – Regionalização Hidrossedimentológica Prévia do Brasil.....	125
Tabela 4.3.16 – Classificação das Zonas Hidrossedimentológicas pela sua Predisposição Presente (1988) aos Riscos Sedimentológicos.....	126
Tabela 4.3.17 – Guia para Correção da Descarga do Leito e para Orientação do Método de Obtenção dessa Descarga.	134
Tabela 4.3.18 – Peso Específico Aparente Estimado.....	137
Tabela 4.3.19 – Matriz para Determinação da Distribuição da Variação de Cargas Hidráulicas (Δh) no Aquífero Livre na Margem de Reservatório.....	160
Tabela 4.3.20 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Terrenos.....	167
Tabela 4.3.21 – Erosão Estimada nos Nove Primeiros Anos da Operação da UHE Itaipu	176
Tabela 4.3.22 – Recuo de Margem no Reservatório da UHE Itaipu	177
Tabela 4.3.23 – Atividade Sísmica Induzida por Reservatórios	191
Tabela 4.3.24 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Limnologia....	212
Tabela 4.3.25 – Principais Características Limnológicas dos Reservatórios que alteram a Qualidade do Rio a Jusante	213
Tabela 4.3.26 – Efeitos na Qualidade da Água a Jusante.....	214
Tabela 4.3.27 – Comparação das Características de Lagos e Reservatórios	218
Tabela 4.3.28 – Ocorrência de Estratificação Térmica em Reservatórios Brasileiros	243
Tabela 4.3.29 – Parâmetros Limnológicos no Reservatório de Tucuruí.....	260
Tabela 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”.....	273
Tabela 5.2.1 – Medidas Preventivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório	293
Tabela 5.2.2 – Medidas Corretivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório	294
Tabela 5.2.3 – Controle de Erosão no Canal de Jusante de Barragem – Medidas Preventivas e Corretivas.....	295
Tabela 5.2.4 – Problemas de Qualidade da Água no Lago Paranoá	343

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE = Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABRH = Associação Brasileira de Recursos Hídricos

ADA = Área Diretamente Afetada

AHE = Aproveitamento Hidrelétrico

AI (AII) = Área de Influência (ou Área de Influência Indireta)

AIA = Avaliação de Impacto Ambiental

ANA = Agência Nacional de Águas

ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica

BCOLD = Brazilian Committee on Large Dams

BID = Banco Interamericano de Desenvolvimento

CBDB = Comitê Brasileiro de Barragens

CEI = Comunidade dos Estados Independentes (antiga URSS, União das Repúblicas Socialistas Soviéticas)

CEMIG = Companhia Energética de Minas Gerais

CEPIS = Centro Paramericano de Ingenieria Sanitária y Ciencias del Ambiente

CESP = Companhia Energética de São Paulo

CHESF = Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CODEVASF = Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco

CONAMA = Conselho Nacional de Meio Ambiente

DAEE = Departamento de Águas e Energia Elétrica

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEA = Disponibilidade Específica de Água

DNAEE = Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DNOCS = Departamento Nacional de Obras contra as Secas

EIA = Estudos de Impacto Ambiental

ELETROBRÁS = Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

ELETRONORTE = Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

EPA = Environmental Protection Agency

EPUSP = Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ETP = Evapotranspiração Potencial

ETR = Evapotranspiração Real

EUA = Estados Unidos da América do Norte

FCTH = Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

FEEMA/RJ = Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente / Rio de Janeiro

FNDCT = Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FURNAS = Furnas Centrais Elétricas S.A.

GWP = Global Warming Potencial

IBAMA = Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICOLD = International Commission on Large Dams

INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

IPH = Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

JCA = Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico

LI = Licença de Instalação

LO = Licença de Operação

LP = Licença Prévia

MAB = Movimento dos Atingidos por Barragens

N = norte (Ponto Cardeal)

NA = nível d'água

NEPA = National Environmental Policy Act

OCDE = Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (integrada por América do Norte, Europa Ocidental, Oceania, México, Turquia e Japão)

OD = oxigênio dissolvido

OIE = Oferta Interna de Energia

OMM = Organização Meteorológica Mundial

ONS = Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU = Organização das Nações Unidas

PBA = Projeto Básico Ambiental

pH = potencial hidrogeniônico

PIB = Produto Interno Bruto

RIMA = Relatório de Impactos no Meio Ambiente

RMSP = Região Metropolitana de São Paulo

S = sul (ponto cardinal)

SERLA/RJ = Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas / Rio de Janeiro

SP = Sondagem a Percussão

SUREHMA = Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Paraná

UHE = Usina Hidrelétrica

UNESCO = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

URSS = União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

UTE = Usina Termelétrica

UV = radiação ultravioleta invisível proveniente do sol

UVA = radiação ultravioleta de longo comprimento de onda

UVB = radiação ultravioleta de pequeno comprimento de onda

UVC = radiação ultravioleta absorvida pela camada de ozônio

W = oeste (ponto cardinal)

WDC = The World Commission on Dams

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

aa = ao ano

Ar = argônio

C = carbono

Ca²⁺ = cálcio

CFC_s = clorofluorcarbonos

CH₄ = metano

CO = monóxido de carbono

CO₂ = dióxido de carbono ou gás carbônico

DIN = nitrogênio dissolvido

DIP = fósforo dissolvido

Fe³⁺ = ferro

g = grama

GW = gigawatt (10⁹ W)

ha = hectare

H₂S = gás sulfídrico

(H₂O)_g = vapor d'água

K⁺ = potássio

kg = quilograma

kW = kilowatt (10³ W)

l = litros

m = metro

m² = metro quadrado

m³ = metro cúbico

mg = miligrama

Mg²⁺ = magnésio

MW = megawatt (10⁶ W)

NO₃⁻ = nitrato

NO₂⁻ = nitrito ou dióxido de nitrogênio

NH₄⁺ = amônia

Na⁺ = sódio

N₂ = nitrogênio

N₂O = óxido nitroso

NO_x = óxidos de nitrogênio

O₂ = oxigênio

O₃ = ozônio

°C = graus centígrados

PO₄³⁻ = fosfato

P = fósforo

SO₂ = dióxido de enxofre

t = tonelada

tep = tonelada equivalente de petróleo

TN = nitrogênio total

TP = fósforo total

TW = terawatt (10^{12} W)

W = watt

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Barragens são construídas há milhares de anos. A evidência mais antiga da interferência humana em rios são as ruínas de canais de irrigação da Mesopotâmia, com mais de oito mil anos. Vestígios de barragens de armazenamento de água encontradas no Jordão, Egito e outros locais do Oriente Médio datam de, no mínimo, 3000 AC (WCD, 2000).

Registros históricos indicam que o uso de barragens para irrigação e abastecimento se tornou mais difundido cerca de mil anos depois. Nesta época, construíam-se barragens na região Mediterrânea, China, Andes e América Central. Vestígios de barragens de terra construídas para derivação de água para grandes reservatórios ainda podem ser encontrados no Sri Lanka e em Israel. O projeto de irrigação Dujiang, que fornecia água para 800.000 ha de terras agriculturáveis na China, tem 2.200 anos. Até hoje existem barragens e aquedutos construídos pelos Romanos a partir de 312 AC para abastecimento de água potável (WCD, 2000).

Uma das barragens mais antigas existentes é a de Tashahayan, na China, com 27 m de altura, construída em 833. Na Inglaterra, a primeira grande barragem, com 15 m de altura, foi concluída em 1787 (PORTO, 1991). A primeira barragem com finalidade de geração hidrelétrica que se tem notícia foi inaugurada em 30/09/1882, em Appleton, Wisconsin, EUA. (IWPDC, 1993).

No Brasil, o marco histórico do início da construção de barragens foi a prolongada seca ocorrida no Nordeste entre 1877 e 1880, quando foi concebido o programa de combate às secas, com a implantação de soluções hidráulicas ou obras de engenharia, através de reservatórios de acumulação (GARRIDO, 2000). Mas o grande programa de construção de barragens no Brasil está relacionado com a geração de energia elétrica.

O uso público da hidreletricidade no Brasil data dos últimos anos do Império. O crescimento das exportações do país, especialmente de café e borracha, culminou com a modernização da infra estrutura necessária à produção e transporte de

mercadorias. Tal modernização abrangia os serviços públicos urbanos de linhas de bonde, água, esgoto, iluminação pública, produção e distribuição de energia elétrica.

Em setembro de 1889, às vésperas da Proclamação da República, foi inaugurada a primeira hidrelétrica de maior porte, a Usina de Marmelos no rio Paraibuna, com potência instalada de 250 kW, com o objetivo de fornecer eletricidade para iluminação de Juiz de Fora, em Minas Gerais (SANTOS; FREITAS, 2000).

Até 1901 predominava a geração de energia elétrica através de centrais termelétricas, quando entrou em operação a “Hydroelétrica da Parnahyba”, no rio Tietê, em Santana do Parnaíba, atual Edgard de Souza, com potência instalada de 2.000 kW, a primeira usina da Companhia Light e a primeira usina a utilizar barragem de mais de 15m de altura. A seguir, em 1907, a Light inaugurou a usina hidrelétrica de Fontes no ribeirão das Lajes, que era uma das maiores do mundo na ocasião, com 24.000 kW de potência instalada e com a função de gerar eletricidade para a cidade do Rio de Janeiro (SANTOS; FREITAS, 2000).

No século XX dezenas de milhares de barragens foram construídas em diferentes partes do mundo, a maioria delas com a finalidade de abastecimento e irrigação. Segundo estimativas do ICOLD (International Commission on Large Dams), de 1998, e de outras fontes (WCD, 2000), existiam, respectivamente, mais de 25.000 e mais de 45.000 grandes barragens no final do século XX, reservando água para agricultura irrigada, usos doméstico e industrial, geração de energia e controle de cheias, principalmente.

Portanto, a implantação de barragens vem possibilitando, ao longo dos anos, o desenvolvimento humano e o atendimento às crescentes necessidades das populações. Por outro lado, nos últimos anos, a construção de barragens tem sido objeto de críticas severas, devido aos impactos nos meios físico, biótico e sócio-econômico. De fato, as barragens alteram e/ou desviam o escoamento dos rios, afetando o direito e o acesso à água previamente existentes, e podendo resultar em impactos significativos no meio de subsistência das comunidades ribeirinhas e no meio ambiente como um todo.

O presente trabalho de dissertação pretende levantar os impactos gerais da implantação de barragens de qualquer porte e finalidade, selecionando, para uma análise mais detalhada, alguns dos impactos físicos principais, para, a seguir, qualificar estes impactos, avaliá-los, quantificá-los, priorizá-los e apresentar possíveis soluções para sua eliminação ou minimização.

Dentre os impactos físicos mais comuns de uma barragem tem-se:

- alteração do regime de vazões do rio;
- erosão das margens e do fundo do canal a jusante da barragem, nos deltas e estuários;
- alteração do nível freático nas áreas marginais do reservatório;
- possibilidade de alteração do micro clima na região do reservatório;
- alteração no teor de matéria orgânica e nutrientes dissolvidos na vazão efluente;
- alteração no transporte e concentração de sedimentos no reservatório e a jusante da barragem;
- estratificação térmica do reservatório;
- alteração da qualidade da água pela decomposição da biomassa inundada no reservatório;
- alteração da condutividade elétrica;
- contaminação e eutrofização das águas do reservatório;
- instabilidade de encostas do reservatório;
- sismicidade induzida pelo reservatório;
- salinização dos solos no entorno do reservatório.

As questões a que se pretendeu responder foram:

- quais destes impactos são os mais significativos e relevantes;
- quais as medidas mitigadoras ou corretivas a serem adotadas para evitar suas conseqüências.

Assim, no Capítulo 2 é apresentado um panorama geral das barragens existentes ao redor do mundo, sua distribuição pelos continentes, pelos tipos de usos e a evolução da construção de barragens no século XX. É apresentado também um panorama das barragens brasileiras. No Capítulo 3 consta uma síntese do histórico de utilização dos estudos de impactos no meio ambiente no processo decisório dos países, os impactos de barragens e os impactos de outras fontes disponíveis para obtenção de água e de energia. A seguir, no Capítulo 4, tem-se a descrição detalhada de alguns dos principais Impactos Físicos de Barragens e, no Capítulo 5 as Soluções e Medidas para eliminá-los ou atenuá-los. Tanto no Capítulo 4 como no 5 são apresentados exemplos da ocorrência de impactos e das medidas adotadas em algumas barragens. Por fim, no Capítulo 6 tem-se as Conclusões e Recomendações dos estudos.

CAPÍTULO 2 – GENERALIDADES

2.1 – Barragens

2.1.1 – Demanda d'Água no Mundo

Nos últimos anos a construção de barragens tem sido crescentemente contestada, do mesmo modo que a água tem atraído a atenção de povos e autoridades em todos os países ao redor do mundo. Porque esta súbita atenção à um recurso que sempre foi central às necessidades humanas?

Uma das respostas a esta questão diz respeito à demanda por água, que vem ultrapassando rapidamente os estoques disponíveis em várias partes do mundo. Conforme a população cresce e aumenta o desenvolvimento econômico, a demanda por água se eleva rapidamente, pressionando os estoques disponíveis. Isto pode causar tensões sociais, havendo quem preveja que a Terceira Guerra Mundial será deflagrada por disputas pela água. Mesmo que se considere esta previsão exagerada, o acesso à água superficial e subterrânea tem sido um tema crescentemente preocupante.

As atenções e críticas às barragens são, na verdade, as referentes à água propriamente dita, já que os aspectos técnicos dos projetos - tais como a escolha entre barragem de concreto, de terra, de enrocamento ou barragem mista (concreto e terra ou enrocamento) – estão bastante consolidados. Todas as questões atualmente apresentadas referem-se aos impactos que a barragem e o reservatório provocarão no escoamento do rio, nos direitos de acesso à água e aos recursos do rio, nos núcleos urbanos e rurais, na cultura, nos meios de subsistência das comunidades e nos recursos ambientais.

Hoje, cerca de 3.800 km³ de água doce são consumidos anualmente, retirados dos lagos, rios e aquíferos. Isto corresponde a duas vezes o volume extraído há 50 anos (WCD, 2000). A população mundial, que era de aproximadamente 2,7 bilhões em 1950, passou dos 6 bilhões e as projeções sugerem que continuará aumentando, até atingir entre 7,3 e 10,7 bilhões em torno do ano 2050, quando, então, deverá estabilizar ou decrescer. Em 1995, 46% da população mundial vivia em áreas urbanas. Mantida a tendência atual, em 2050 haverá mais de 70% da população mundial vivendo em áreas urbanas (WCD, 2000).

Atualmente, bilhões de habitantes das áreas rurais não têm acesso ao saneamento básico. A urbanização rápida prevista criará formas de crescimento urbano insustentáveis, transferindo a pobreza da área rural para a urbana, aumentando rapidamente a demanda por água e energia nas cidades.

A economia mundial quintuplicou desde 1950, com uma taxa média de 4 % ao ano, aproximadamente (WCD, 2000). O crescimento da economia, que nos últimos 25 anos tem sido mais significativo na Ásia, tem duas implicações sobre o consumo da água: por um lado o aquecimento econômico leva ao aumento direto da demanda por serviços relacionados com a água e, por outro lado, pode levar a uma possível economia de água, provocada por mudanças tecnológicas. Assim, países com o mesmo PIB per capita, mas diferentes características produtivas, como agricultura altamente irrigada ou indústrias com intenso consumo de água, podem consumir três ou quatro vezes mais água por dólar do PIB. A redução proporcional no consumo de água se confirma no período mencionado, desde 1950 até 1990, em que a economia mundial quintuplicou e o consumo de água apenas duplicou (WCD, 2000), acompanhando, aproximadamente, o crescimento populacional. Com exceção dos produtos agrícolas, houve uma redução global do consumo de água por dólar produzido, como resultado de melhores tecnologias, maior reciclagem, maior preço da água, maiores restrições ambientais e substituição das atividades industriais que consomem intensivamente recursos naturais.

Conforme apresentado, tanto o aumento da população quanto do nível de atividade econômica elevam o consumo humano de água e serviços a ela relacionados. O desenvolvimento econômico afeta a renda, a distribuição de renda e o estilo de vida das populações e, conseqüentemente, o nível de consumo das residências, que passam a ter mais equipamentos eletrodomésticos e melhor padrão de instalações sanitárias.

O consumo de água varia muito de uma região para outra do mundo, sendo influenciado por fatores climáticos e culturais. Mesmo assim, diversas agências e especialistas internacionais admitem que o consumo de 50 litros por pessoa por dia de água doce cobre as necessidades humanas básicas de água para o consumo, culinária, limpeza e higiene (WDC, 2000). Em 1990 mais de um bilhão de pessoas viviam abaixo deste nível de consumo, enquanto que nos países ricos e em domicílios ricos em países em desenvolvimento o consumo variava entre 4 a 14 vezes esta taxa (WDC, 2000). Esta

disparidade denota não apenas a diferença de estilo de vida como também a demanda reprimida nos países mais pobres.

Quanto à questão dos usos da água, analistas prevêem o aumento de competição pelo uso, além do aumento da demanda em si. Hoje a agricultura representa, em termos globais, 67% do consumo, a indústria, 19%, e os usos doméstico e municipal representam 9% do consumo total. Em climas secos a evaporação dos grandes reservatórios representa quase 5% do total de água consumido (WDC, 2000).

Regionalmente ocorrem diferenças sensíveis entre as taxas percentuais por tipo de uso, conforme Figuras 2.1.1 e 2.1.2. Enquanto que nos países mais pobres da África, Ásia e América Latina o consumo para agricultura prevalece sobre os demais usos, com quase 85% de toda água retirada, nos países mais ricos este consumo representa menos que 40% do total. A situação se inverte quando se analisa o uso doméstico, que representa menos de 5% nos países mais pobres, e até 20% do total nos demais países, exceto na Oceania, cujo consumo doméstico é superior a 20%. Nos países mais ricos da Europa e América do Norte a indústria é o maior consumidor de água (WDC, 2000).

1-Países pobres da África, Ásia e América Central

2-Países em desenvolvimento da América Latina, África, Ásia e Europa

3- Países ricos da Europa, Ásia e Oceania

4- Países industrializados: América do Norte e países da Europa, Ásia e Oceania

Figura 2.1.1 – Consumo Regional de Água Doce por Uso (1996)

Fonte: WCD, 2000

No Brasil o uso da água para agricultura representa 68% do total, o uso doméstico 18% e o industrial 14% (SEMINÁRIO, 2003). No Estado de São Paulo as porcentagens são de 43% para agricultura, 32% para domicílios e 25% para indústrias, enquanto que na RMSP as porcentagens são de 82,85% para uso residencial, 8,45% para uso comercial, 2,15% para industrial e 6,55% para outros usos, como consumo municipal (SEMINÁRIO, 2003).

Figura 2.1.2 – Demanda Média Anual de Água Doce per Capita (consumo próprio e demais usos: irrigação, industrial, doméstica e municipal)

Fonte: WCD, 2000

Nos países com maior carência de água, que se encontram em processo de industrialização e que têm grandes populações urbanas, a presente crise de água gira em torno do abastecimento doméstico e industrial, geralmente. Isto se torna evidente pela tendência marcante observada nas últimas décadas de se desviar a água da agricultura para usos municipal e industrial. Essa situação deve se agravar ainda mais, tendo em vista que a crescente necessidade de produção de alimentos deverá elevar o consumo de água para agricultura de cerca de 15 a 20 % até 2025. (WCD, 2000).

Além das demandas humanas há ainda a demanda da natureza por água doce. Os ecossistemas que fornecem o meio de subsistência às comunidades ribeirinhas e muitos outros bens e serviços para a sociedade dependem da água.

A chuva e outras fontes de água doce, como os rios, lagos e lençóis subterrâneos são distribuídos de forma desigual ao redor do mundo e nem sempre onde existe a demanda pela água. A poluição atinge as águas superficiais e subterrâneas e pode torná-las impróprias para o consumo ou exigir tratamentos onerosos. A poluição é especialmente séria onde os recursos subterrâneos são superexplorados e sofrem com as reduzidas taxas de recarga, devido à extinção das florestas, mudanças no uso da terra e urbanização. Em muitas partes da Índia, Paquistão e China o nível do lençol está abaixando a taxas entre 1 e 2 m ao ano (WCD, 2000).

Nas Figuras 2.1.3 e 2.1.4 são apresentadas a distribuição de água doce no mundo e os países com as maiores carências de água. Estima-se que um terço dos países situados nas regiões de maiores carências de água irão passar por severa escassez neste século, incluindo regiões de países pobres como a Índia e a China. Prevê-se que haverá 3,5 bilhões de pessoas vivendo nestes países em 2025 (WCD, 2000).

Figura 2.1.3 – Distribuição da Água no Mundo
Fonte: WCD, 2000

Figura 2.1.4 – Países com Carência de Água
(Consumo anual de água superior a 25% dos recursos naturais anuais)
Fonte: WCD, 2000

A disponibilidade hídrica brasileira média atual é de 35.000 m³/habitante x ano. Esse índice, denominado DEA – Disponibilidade Específica de Água, é considerado satisfatório quando supera 10.000 m³/habitante x ano e é crítico, aquém do limite de disponibilidade, quando não atinge 500 m³/habitante x ano. Portanto, o Brasil poderia ser considerado privilegiado quanto à disponibilidade de água, mas existem grandes desigualdades regionais, sendo que na RMSP – Região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, a DEA é de 202 m³/habitante x ano (SEMINÁRIO, 2003). De maneira geral existe superávit hídrico no Norte, Centro Oeste e Sul do país, com DEA superior a 10.000 m³/hab x ano e carência no Nordeste e no Sudeste, com DEA entre 4.000 e 5.000 m³/hab x ano (SEMINÁRIO, 2003).

Quanto à demanda de água também ocorrem grandes variações regionais, desde 204 m³/hab x ano no Norte até 716 m³/hab x ano no Sul, com média nacional de 414 m³/hab x ano, ou 1,18% da DEA. A demanda d'água refere-se aos usos: doméstico, municipal, industrial e para agricultura.

O consumo doméstico brasileiro, para culinária, limpeza, higiene e consumo próprio, apresenta as seguintes taxas médias: 125, 165 e 225 l/habitante x dia, respectivamente para cidades pequenas, médias e grandes. Na RMSP o consumo médio per capita total é de 170 l/hab x dia, correspondendo a 147 l/hab x dia de consumo efetivo e mais 15,5% desse valor a título de perdas aparentes (SEMINÁRIO, 2003).

2.1.2 – Demanda de Energia no Mundo

A demanda mundial de energia ou Oferta Interna de Energia (OIE) totalizava cerca de 9.900×10^6 tep (tonelada equivalente de petróleo) em 2000 (BRASIL, 2003). A população mundial era de mais de 6 bilhões de habitantes e o PIB mundial era de 33.000 bilhões de dólares (ano de referência do dólar 1997).

Nos estudos de expansão do consumo de energia, efetuados para o horizonte do ano 2020 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (“International Energy Outlook 2002”, apud BRASIL, 2003), foram considerados os dados históricos sobre a evolução do PIB e da OIE no período 1970 a 2000, três cenários macroeconômicos

internacionais pelos próximos 20 anos e três grupos de países: industrializados, em desenvolvimento e em estruturação.

Os países do primeiro grupo são: EUA, Canadá, México, Inglaterra, França, Alemanha, Itália, Japão, Austrália e outros industrializados da Europa. Dentre os países em desenvolvimento tem-se: China, Índia, Coréia do Sul, Turquia, países das Américas Central e do Sul, da África, da Ásia e do Oriente Médio. E dentre os países em reestruturação econômica (EE-FSU) tem-se: Rússia, Ucrânia, Belarus, Casaquistão, Bulgária, Albânia, Croácia, outros da antiga URSS e da Europa.

Na Figura 2.1.5 a seguir é apresentada a evolução do PIB mundial, considerando-se a taxa média de 3,2% ao ano (aa) no cenário de referência, pouco superior ao crescimento médio histórico de 3,1% aa no período 1970-2000 (BRASIL, 2003). Na Figura 2.1.6 são apresentadas as taxas de crescimento do PIB em cada um dos três grupos de países, e a evolução do PIB no Brasil, nos mesmos períodos.

Figura 2.1.5 – PIB Mundial (em bilhões de dólares/97)
Fonte: BRASIL, 2003

Figura 2.1.6 – Crescimento do PIB por grupo (em % aa)
Fonte: BRASIL, 2003

O crescimento médio da população mundial foi calculado com base numa taxa média de 1,13% aa, atingindo 7,57 bilhões de habitantes em 2020. No caso do Brasil, para a taxa de 1,08% aa, haverá uma população de 211 milhões de habitantes em 2020.

Quanto à OIE, ou demanda mundial de energia, no cenário de referência serão consumidos 15.410×10^6 tep em 2020, com taxa média de crescimento de 2,26% aa, pouco superior aos 2,14% aa do período histórico 1970-2000 (BRASIL, 2003). Também nesses cálculos foram admitidas taxas diferenciadas entre os três grupos de países e, dentro de cada grupo, taxas específicas para cada país. No caso do Brasil, foi considerada uma taxa de crescimento média de 3,3% aa, que resultou num consumo de 424×10^6 tep em 2020. Nas Figuras 2.1.7 e 2.1.8 a seguir são apresentadas: a evolução da OIE e da Intensidade Energética nos três grupos de países considerados.

Figura 2.1.7 – Oferta Interna de Energia (10^6 tep)

Fonte: BRASIL, 2003

Figura 2.1.8 – Intensidade Energética (tep/mil US\$)

Fonte: BRASIL, 2003

A Intensidade Energética mede o consumo de energia por dólares do PIB, sendo que a intensidade energética mundial foi admitida como decrescente à taxa de 0,95% aa no período projetado, como consequência de um maior esforço de racionalização do consumo em relação ao período 1970-2000, quando a redução foi de 0,92% aa. Para o Brasil o estudo previu uma taxa de redução da intensidade energética de -1,59% aa, resultante de um crescimento industrial menos intensivo em energia e da introdução de processos e fontes de energia mais eficientes (BRASIL, 2003).

Comparando a participação das fontes de energia na OIE mundial, na projeção efetuada com relação aos dados históricos, observa-se pouca variação, com um pequeno aumento da participação do gás natural, compensado com a redução do carvão mineral, do petróleo e da energia nuclear. As fontes renováveis (hidráulica, biomassa, eólica, solar, etc) se mantêm constantes, conforme Figura 2.1.9 a seguir.

Figura 2.1.9 – Participação das Fontes de Energia na OIE

Fonte: BRASIL, 2003

Quanto às emissões de carbono, na forma de gás carbônico (CO₂), as estimativas para o ano de 2020 são de 9.850 milhões de toneladas de carbono, mantendo praticamente a mesma relação com o consumo de energia, de 0,639 tC/tep (BRASIL, 2003). Na Figura 2.1.10 a seguir apresenta-se a evolução das emissões de carbono nos três grupos de países considerados.

Figura 2.1.10 – Emissões de Dióxido de Carbono por Grupo (milhões de toneladas)

Fonte: BRASIL, 2003

A energia utilizada na indústria, transporte, comércio e demais setores econômicos recebe a denominação de Consumo Final de Energia. Essa energia, para chegar ao consumidor final, é transportada por gasodutos, linhas de transmissão, rodovias, ferrovias e passa por processos de transformação em refinarias, hidrelétricas, carvoarias, etc. Tanto o transporte quanto os processos de transformação e armazenagem demandam perdas de energia.

A soma das perdas com o consumo final de energia resulta na Oferta Interna de Energia – OIE – também denominada matriz energética ou demanda total de energia. Na Figura 2.1.11 a seguir apresenta-se a evolução do Consumo Final e da OIE no Brasil, no período 1970 a 2002.

Figura 2.1.11 – Demanda de Energia (milhões tep)

Fonte: BRASIL, 2003

Conforme se observa na figura, as perdas tem aumentado proporcionalmente com o Consumo Final. Os dois períodos com performance negativa das curvas corresponderam à recessão econômica mundial, em 1981, provocada pelo aumento dos preços internacionais do petróleo em 1979, e ao plano econômico denominado Plano Collor, em 1990, que bloqueou o dinheiro em circulação.

A OIE em 2002 no Brasil, conforme a Figura 2.1.11, foi de 198 milhões de tep, montante 196% superior ao de 1970 e equivalente a 2% da demanda mundial (BRASIL, 2003). A indústria de energia no Brasil responde por 86% do consumo nacional, sendo que os 14% restantes são importados, principalmente petróleo e derivados, carvão mineral, gás natural e, em quantidade menor, energia elétrica.

No Brasil cerca de 41% da OIE provem de fontes renováveis, sendo que 14% correspondem à geração hidráulica e 27% à biomassa (BRASIL, 2003). Na Figura 2.1.12 a seguir tem-se a participação das fontes renováveis na OIE no Brasil, nos países da OCDE e no mundo. Os 59% restantes da OIE provem de fontes fósseis e outras não renováveis. Essa característica peculiar do Brasil resultou do grande desenvolvimento do parque gerador de hidreletricidade desde a década de 50 e das políticas públicas adotadas após a segunda crise do petróleo, ocorrida em 1979, visando a redução do consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Figura 2.1.12 – Estrutura da OIE (%)

Fonte: BRASIL, 2003

Dentre as políticas de redução da dependência externa do petróleo, destaca-se o Proálcool, de 1975, programa de produção de álcool combustível, e o aumento da produção nacional de petróleo, com o desenvolvimento de novas tecnologias de prospecção e exploração pela Petrobrás. Além disso, foram aplicadas novas tecnologias à construção e operação de centrais hidrelétricas, bem como à operação de sistemas de transmissão a grandes distâncias e em corrente contínua.

Como consequência dessas medidas, a dependência externa de energia, que era crescente na década de 70, aumentando de 28% no início da década para cerca de 46% no final, reduziu-se para 14% do total consumido no país. No caso do petróleo, a redução foi ainda mais significativa, de cerca de 85% em 1979 para 12,8% em 2002 (BRASIL, 2003).

Com relação à composição das diversas fontes na estrutura da OIE, observam-se grandes transformações, principalmente no período 1979 a 1985. O processo de desenvolvimento induz à redução do uso de lenha, que é substituído por gás liquefeito de petróleo ou gás natural. Isso se deu na década de 70, com atenuação no processo de substituição no início da década de 80, em consequência da elevação dos preços do gás e do óleo combustível, conforme se observa na Figura 2.1.13 a seguir.

Figura 2.1.13 – Oferta Interna de Energia (%)

Fonte: BRASIL, 2003

Quanto ao álcool e bagaço de cana, observa-se participação crescente entre 1975 e 1985, estabilizando-se a seguir. A energia hidráulica também teve aumento de participação no período 1970-2002 e o carvão mineral foi impulsionado pela indústria metalúrgica no início da década de 80, permanecendo constante após 1985.

Por fim, o gás natural vem apresentando um desenvolvimento crescente nos últimos anos, como consequência da descoberta de novas reservas nacionais e da importação de gás da Bolívia. Nas Figuras 2.1.14 e 2.1.15 pode-se observar a participação das diversas fontes de energia na OIE no Brasil em 2002 e no mundo em 2000.

Figura 2.1.14 – OIE 2002, BRASIL

Fonte: BRASIL, 2003

Figura 2.1.15 – OIE 2000, Mundo

Fonte: BRASIL, 2003

O Consumo Final de Energia em 2002 no Brasil foi de 177,4 milhões de tep, correspondente a 89,6% da OIE e 2,9 vezes superior ao consumo de 1970 (BRASIL, 2003). Os setores de maior consumo de energia em 2002 eram: a indústria, com 37% do total, o transporte, com 27%, e o residencial, com 12%, correspondendo a 76% do total global. Na Figura 2.1.16 a seguir apresenta-se o consumo final por setor e a evolução a partir de 1970.

Figura 2.1.16 – Consumo Final de Energia por Setor (milhões tep)

Fonte: BRASIL, 2003

Com relação à evolução do PIB brasileiro, na Figura 2.1.17 a seguir tem-se a comparação das taxas médias de crescimento ao ano do PIB e da OIE, para alguns períodos característicos, correspondentes aos ciclos de crescimento e estagnação da economia. No período 1970-2002, conforme essa figura, houve um crescimento de 4% do PIB, enquanto a OIE cresceu 3,4%.

Figura 2.1.17 – Taxas Médias de Crescimento ao Ano (%)

Fonte: BRASIL, 2003

Com uma população de 174,6 milhões de habitantes em 2002, o Brasil apresentava uma OIE de 1,13 tep per capita, inferior à média mundial, de 1,65 tep/hab, e muito abaixo da média dos EUA, de 8,11 tep/hab (BRASIL, 2003). Já com relação ao PIB, a taxa brasileira, de 0,33 tep/mil US\$ (90) se mostrava muito alta, em especial se comparada à taxa japonesa, de 0,15 tep/mil US\$ (90). Isso significa que para cada unidade de PIB o Japão necessita de metade da energia consumida no Brasil.

2.2 – Barragens no Século XX

No último século ocorreu um acréscimo muito rápido no número de grandes barragens construídas. Em 1949 existiam cerca de 5.000 grandes barragens no mundo, três quartos delas em países industrializados. No final do século XX havia entre 25.400 grandes barragens - oficial e voluntariamente registradas no ICOLD - a mais de 45.000 – estimativas de outras fontes (WCD, 2000) – em mais de 140 países.

As diferenças entre os números decorre do fato que as barragens registradas oficialmente no ICOLD em 1998 integram uma lista parcial, incompleta, especialmente no caso da China, que tem registradas 1.855 grandes barragens no ICOLD em 1998, 4.434 em 2000, contra uma estimativa do WCD de 22.000 grandes barragens, também em 2000. Nos outros quatro países de maior concentração de barragens no mundo – Estados Unidos, Índia, Japão e Espanha – em que foi feita uma atualização pelo WCD, o número de barragens estimado foi sempre superior ao registrado oficialmente no ICOLD.

Conforme estabelecido pelo ICOLD em 1928, considera-se grande barragem a que tenha altura igual ou superior a 15 m, contados da fundação. Se a barragem tiver altura entre 5 e 15 m e seu reservatório capacidade superior a 3 milhões de m³, também é considerada como uma grande barragem (WCD, 2000). Por esse segundo critério, uma barragem que forme um reservatório de área igual a 1 km² e 3 m de profundidade média já pode ser considerada como grande barragem.

O crescimento econômico que se seguiu ao final da Segunda Guerra Mundial foi acompanhado por um aumento significativo na taxa global de construção de barragens, culminando nas décadas de 70 e 80. No pico, entre 1970 e 1975, cerca de

5.000 grandes barragens foram construídas ao redor do mundo (WCD, 2000). A queda no ritmo de construção de barragens nas duas últimas décadas foi igualmente acentuada, especialmente na América do Norte e Europa, onde muitos dos locais tecnicamente atraentes já foram utilizados. A idade média atual das grandes barragens é de cerca de 35 anos (WCD, 2000).

Os cinco países com maior concentração de barragens no mundo totalizam cerca de 80% das grandes barragens, sendo que a China, sozinha, possui quase metade das grandes barragens do mundo, a se considerar as 22.000 barragens estimadas pelo WCD (2000). Antes de 1949, a China possuía apenas 22 grandes barragens. Os Estados Unidos possuem atualmente mais de 6.390 grandes barragens, a Índia mais de 4.000, o Japão e a Espanha entre 1.000 e 1.200 grandes barragens cada um (WCD, 2000).

Na Figura 2.2.1 a seguir tem-se a distribuição proporcional de grandes barragens nas diferentes regiões do mundo, observando-se que dois terços delas encontram-se em países em desenvolvimento. Nessa figura, a quantidade de grandes barragens da China (22.000) é a estimada pelo WCD (2000). Nas Figuras 2.2.2 e 2.2.3, por outro lado, tem-se as tendências parciais e acumuladas por década, ao longo do último século, considerando-se apenas os dados oficiais do ICOLD/1998 para a China (1.855 grandes barragens).

Figura 2.2.1 – Distribuição Regional das Grandes Barragens em 2000

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.2.2 – Evolução no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.2.3 – Evolução Acumulativa no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX

Fonte: WCD, 2000

Da análise da Figura 2.2.3 pode-se observar que o incremento mais pronunciado no número de barragens construídas aconteceu na América do Norte, Europa e Ásia, a partir dos anos 50, enquanto que nos países da África, América do Sul e Oceania o crescimento foi praticamente linear ao longo do século XX.

No final do século XX, após o pico da década de 70, a Europa e a América do Norte não estavam mais construindo novas barragens, limitando-se a gerenciar as existentes. Nas demais regiões havia cerca de 1.700 barragens em construção no final do século, sendo 40% delas na Índia, com finalidade de fornecer água para irrigação e usos múltiplos (WCD, 2000).

Por outro lado, no final do século XX, surgiu também uma outra tendência relacionada às grandes barragens: o descomissionamento. Assim, barragens que não servem mais a um propósito útil, tem manutenção muito dispendiosa ou níveis de impactos intoleráveis, segundo a ótica atual, estão sendo descomissionadas. Esta tendência tem sido verificada especialmente nos Estados Unidos, onde quase 500 barragens, principalmente as mais antigas e menores, foram descomissionadas (WCD, 2000). Desde 1998 a taxa de descomissionamento de barragens nos Estados Unidos tem excedido a taxa de construção (WCD, 2000).

O descomissionamento permite a restauração dos processos pesqueiros e ecológicos ribeirinhos, mas também pode causar impactos ambientais, como o súbito escoamento dos sedimentos acumulados no reservatório, que podem estar contaminados com substâncias tóxicas, prejudicando a vida aquática. Outros impactos locais também devem ser considerados, como: o prejuízo para as captações d'água, controle de cheias, recreação, navegação e outros serviços proporcionados pela barragem, pela alteração no escoamento e nos níveis d'água, e os impactos na ocupação do entorno do reservatório e nas margens do rio a jusante. Portanto, o descomissionamento deve ser precedido de estudos ambientais que indiquem as ações mitigadoras adequadas a cada caso.

Barragens de grande porte tem sido consideradas como um importante meio de conseguir satisfazer as necessidades de água e energia e, a longo prazo, um investimento estratégico com capacidade para agregar inúmeros benefícios. Alguns destes benefícios são típicos de todos os grandes projetos de infraestrutura, enquanto os demais são exclusivos de barragens e específicos para projetos particulares. Dentre os primeiros benefícios pode-se citar o desenvolvimento regional, a criação de empregos e o fomento a uma indústria de base com capacidade para exportação. Outros benefícios incluem a criação de renda com o lucro das exportações, sejam elas da venda direta da eletricidade, de safras ou de produtos processados em indústrias eletrointensivas, como a de alumínio.

Grandes barragens exigem investimentos financeiros significativos para a construção, enquanto que para operação e manutenção os investimentos são pequenos. Estimativas sugerem que foram aplicados, no mínimo, 2 trilhões de

dólares na construção de barragens ao redor do mundo no último século. Na década de 90 foram consumidos entre 32 e 46 bilhões de dólares anualmente, dois terços deste valor em países em desenvolvimento, conforme consta da Tabela 2.2.1 a seguir. Dos 22 a 31 bilhões investidos nestes países, cerca de 4/5 foi financiado diretamente pelo setor público (WCD, 2000).

Tabela 2.2.1 – Investimentos Anuais em Barragens na Década de 90

USO DA BARRAGEM	INVESTIMENTOS (US\$ BILHÕES/ANO)		
	PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO	PAÍSES DESENVOLVIDOS	TOTAL
Geração de Energia	12 a 18	7 a 10	19 a 28
Irrigação	8 a 11	3 a 5	13 a 18
Abastecimento	1,5		
Controle de Cheias	0,5 a 1		
Total	22 a 31	10 a 15	32 a 46

Fonte: WCD, 2000

Observa-se que, apesar dos investimentos dos países desenvolvidos serem inferiores, a predominância quanto ao uso, para geração de energia, foi a mesma e ainda mais acentuada que nos países em desenvolvimento na década de 90.

2.3 – Usos Predominantes das Barragens por Região

As grandes barragens regulam, armazenam e derivam a água dos rios principalmente para a produção agrícola, usos doméstico e industrial em cidades, geração elétrica e controle de cheias. Em menor escala as barragens foram construídas para permitir a navegação e, uma vez criados para outros usos, os reservatórios de muitas grandes barragens tem sido usados para recreação, turismo e aquíicultura.

Os reservatórios das barragens são operados de maneira diversa para cada uma de suas finalidades. Para geração de energia, abastecimento d'água e irrigação é necessário que o reservatório esteja cheio, de modo a garantir o atendimento nos períodos secos. Para amortecimento de cheias é recomendável que o reservatório esteja vazio ou no nível mínimo. Para recreação, o nível d'água do reservatório deve ser mantido constante. Portanto, o uso múltiplo dos reservatórios dificilmente ocorre num nível ideal, obtido quando o uso é singular. Para ilustrar, na Tabela 2.3.1 a

seguir tem-se as principais características dos reservatórios dependendo do uso predominante, segundo STRASKRABA et al. (1993).

Tabela 2.3.1 – Características Gerais de Reservatórios de acordo com seu Uso Principal

USO PRINCIPAL	TAMANHO	PROFUNDIDADE	TEMPO DE RESIDÊNCIA	PROFUNDIDADE DA SAÍDA
Controle Cheias	pequeno a médio	raso	depende região	profunda
Armazenamento	pequeno a médio	-	extremamente variável	abaixo superfície
Geração	médio a grande	profundo	variável	junto ao fundo
Abastecimento	pequeno	preferencialmente profundo	alto	intermediário a profundo
Piscicultura	pequeno	raso	baixo	superficial
Bombeamento	pequeno a médio	profundo	extremamente variável	junto ao fundo

Tamanho: pequeno $V < 100 \text{ Mm}^3$; médio: $100 < V < 1.000 \text{ Mm}^3$, grande: $V > 1.000 \text{ Mm}^3$

Fonte: STRASKRABA et al., 1993

A Figura 2.3.1 a seguir mostra que cerca de um quarto das grandes barragens serve a dois ou mais propósitos. Observa-se a grande variação regional do uso das barragens, ressaltando-se também que ocorreram variações de uso ao longo do tempo.

Figura 2.3.1 – Distribuição das Barragens Existentes por Uso nas Diversas Regiões

Fonte: WCD, 2000

A maioria das grandes barragens da Ásia e África tem a função de acumular água para irrigação. Na Oceania a maioria das grandes barragens tem a função de abastecimento de água. Na Europa e América do Sul predominam as barragens para

geração de energia, enquanto na América do Norte a distribuição das barragens entre os quatro usos singulares selecionados é mais equilibrada. Exceto na América do Norte, pelo menos um uso individual predomina sobre os usos múltiplos em todas as outras regiões. Todos os demais usos potenciais das barragens, como recreação e navegação respondem por 24% na América do Norte e por menos de 5% nas demais regiões (WDC, 2000). Nas Figuras 2.3.2 a 2.3.5 a seguir constam as funções das grandes barragens por região e a evolução do número de barragens construídas em cada década ao longo do século XX, por uso e por região (WCD, 2000).

Figura 2.3.2 – Barragens de Hidrelétricas por Região
Fonte: WCD, 2000

Figura 2.3.3 – Barragens para Irrigação por Região
Fonte: WCD, 2000

Figura 2.3.4 – Barragens para Abastecimento por Região

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.3.5 – Barragens para Controle de Cheias por Região

Fonte: WCD, 2000

2.3.1 – Barragens para Irrigação

A irrigação é responsável pelo maior consumo de água doce no mundo atualmente, cerca de 67% do total consumido (WCD, 2000). Cerca de um quinto da terra agriculturável do mundo é irrigada, correspondendo a 268 milhões de hectares irrigados, e essa área é responsável por 40% da produção agrícola mundial (WCD, 2000).

Mais de um terço (36%) das grandes barragens do mundo foi construída exclusivamente ou com o objetivo principal de irrigação e estima-se que 30 a 40% da área irrigada dependem de barragens. (WCD, 2000).

Quatro países respondem por mais de 50% das terras irrigadas: China, Índia, Estados Unidos e Paquistão (WCD, 2000). A Figura 2.3.6 mostra que a participação das barragens no total de terras irrigadas varia grandemente de um país para o outro. Assim, as barragens (principalmente a barragem de Assuã) abastecem quase 100% das terras irrigadas do Egito, enquanto que no Nepal e em Bangladesh as barragens são responsáveis por apenas 1% da água para irrigação. Nos dois países com as maiores áreas irrigadas – Índia e China – estatísticas oficiais indicam que as grandes barragens respondem por cerca de 30 a 35% da água para irrigação, o restante vindo principalmente de fontes subterrâneas (WCD, 2000).

Figura 2.3.6 – Terras Irrigadas a Partir de Barragens

Fonte: WCD, 2000

2.3.2 – Barragens para Abastecimento Doméstico e Industrial

O consumo global de água doce para abastecimento urbano e industrial é de cerca de 28% do total consumido (WCD, 2000). Cerca de 10% das grandes barragens do mundo são destinadas ao abastecimento de água, sendo que 60% delas se localizam na América do Norte e Europa (WCD, 2000).

A dependência de barragens e reservatórios para o abastecimento urbano e industrial varia grandemente entre os diversos países e, dentro de um mesmo país, em cada região. Assim, na região Saxônica da Alemanha, 40% do abastecimento provem de reservatórios, enquanto que 55% do abastecimento de Los Angeles vem do lençol

subterrâneo (WCD, 2000). Na cidade de Ho Chi Min no Vietnã 89% da água são de fontes superficiais, enquanto que em Hanoi 100% da água consumida vem do lençol (WCD, 2000).

2.3.3 – Barragens para Geração de Energia

Nos últimos 22 anos a produção global de eletricidade duplicou e hoje as hidrelétricas provem 19% do total da energia gerada no mundo, em mais de 150 países (WCD, 2000). Em 24 destes países, inclusive no Brasil, a hidroeletricidade representa 90% do suprimento de energia e em 63 países representa mais que 50% do suprimento. Cinco países – Canadá, Estados Unidos, Brasil, China e Rússia – respondem por mais que a metade de toda a geração hidrelétrica do mundo (WCD, 2000). Cerca de 14% das grandes barragens tem, como função principal, gerar energia.

Hidrelétricas têm sido consideradas e promovidas como uma fonte de energia comparativamente limpa, de baixo custo, renovável, que utiliza tecnologia comprovada. Exceto pela evaporação em reservatórios, é um uso não consuntivo da água. Uma vez implantadas, as hidrelétricas, como todas as fontes renováveis, são consideradas de baixo custo operacional e longa vida útil, em especial as a fio d'água e as barragens em que o problema de sedimentação é insignificante. São especialmente atrativas nos países que dispõem de fontes limitadas de combustíveis fósseis, exigindo importações. Numa escala global, os níveis atuais de geração hidrelétrica equivalem ao consumo diário de 4,4 milhões de barris de óleo na geração elétrica térmica, ou 6% da produção mundial de óleo. (WCD, 2000).

2.3.4 – Barragens para Proteção contra Enchentes

As enchentes naturais têm muitas funções benéficas, mas também significam uma ameaça à vida, saúde, subsistência e à propriedade. Elas permanecem entre os desastres mais freqüentes e danosos. Enchentes afetaram a vida de cerca de 65 milhões de pessoas entre 1972 e 1996, mais que qualquer outro tipo de desastre, incluindo guerras, secas e fome (WCD, 2000). Durante o mesmo período, cerca de 3,3 milhões de pessoas tornaram-se sem teto a cada ano, como consequência de enchentes. (WCD, 2000).

Cerca de 6% de todas as grandes barragens do mundo, em mais que 75 países, tem função de controle de cheias (WCD, 2000). Embora tenham sido bastante utilizadas com esta função, somente nos últimos tempos, após a década de 70, foram efetuados estudos mais aprofundados, com enfoque baseado e integrado aos aspectos ambientais, correlacionando o porte e severidade das enchentes com a degradação ambiental da bacia e seu desmatamento.

2.4 – Atributos Físicos das Grandes Barragens

As Figuras 2.4.1 a 2.4.6 apresentadas a seguir mostram a distribuição das grandes barragens por altura, área do reservatório e volume do reservatório, de maneira geral e nas seis regiões consideradas no estudo do WCD (2000). Estes parâmetros têm influência no uso e operação das barragens e na natureza e âmbito dos impactos.

Figura 2.4.1 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Altura

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.4.2 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Altura

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.4.3 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Área de Reservatório

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.4.4 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Área de Reservatório

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.4.5 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Volume de Reservatório

Fonte: WCD, 2000

Figura 2.4.6 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Volume de Reservatório

Fonte: WCD, 2000

2.5 – Barragens no Brasil

2.5.1 – Geração Hidrelétrica

“Em janeiro de 2002 havia registro de 433 centrais hidrelétricas em operação no Brasil, das quais 337 eram empreendimentos de pequeno porte” (ANEEL, 2002). As 23 centrais hidrelétricas com capacidade de geração superior a 1.000 MW são

responsáveis por 71,4% da capacidade instalada no Brasil, que é de 62.020 MW (ANEEL, 2002). Portanto, a geração hidrelétrica no Brasil é constituída essencialmente por grandes empreendimentos, conforme Tabela 2.5.1 a seguir.

Tabela 2.5.1 – Distribuição das UHEs Brasileiras por Faixa de Potência (jan/2002)

FAIXA DE POTÊNCIA (MW)	Nº DE USINAS	POTÊNCIA (MW)	POTÊNCIA (%)
Até 30	337	1.509	2,4
De 31 a 100	29	1.667	2,7
De 101 a 500	36	9.219	14,9
De 501 a 1.000	8	5.365	8,7
Acima de 1.000	23	44.260	71,4
Total	433	62.020	100,0

Fonte: ANEEL, 2002

O potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em cerca de 260 GW, dos quais 40,5 % estão localizados na bacia hidrográfica do rio Amazonas, seguido pelas do Paraná (23%), Tocantins (10,6%) e São Francisco (10,1%) (ANEEL, 2002). Portanto, a capacidade instalada atual representa apenas 24% do potencial estimado. Com relação ao potencial inventariado, de 165 GW, os aproveitamentos existentes representam 38%. (ANEEL, 2002).

A maioria das grandes centrais hidrelétricas brasileiras com mais de 1.000 MW de potência instalada, está localizada na bacia do rio Paraná, sub-bacias do Paranaíba, Grande e Iguaçu, conforme Figura 2.5.1 e Tabela 2.5.2 a seguir. Entre as demais destacam-se Tucuruí e Serra da Mesa, no rio Tocantins, e Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso IV e Xingó, no rio São Francisco.

Figura 2.5.1 – Usinas Hidrelétricas por Classe de Potência e Bacia Hidrográfica
Fonte: ANEEL, 2002

A concentração de UHEs na região centro-sul do Brasil se deve ao relevo (de planalto) e à proximidade dos centros consumidores de energia. Dados disponíveis (ANEEL, 2002) atestam que as bacias do Paraná e do São Francisco são as mais saturadas atualmente, com índices de aproveitamento de 64% e 40%, respectivamente. Assim, os novos projetos em implantação, ou outorgados mas ainda não iniciados, concentram-se, principalmente, nas bacias do rio Tocantins e do rio Uruguai.

Tabela 2.5.2 – Maiores UHEs em Operação no Brasil em Jan/2002

USINA	PROPRIETÁRIO	MUNICÍPIO-UF	RIO	POT. (kW)
Itaipu (parte Brasil)	Itaipu Binacional	Foz do Iguaçu-PR	Paraná	6.300.000
Tucuruí I	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A	Tucuruí-PA	Tocantins	4.001.000
Ilha Solteira	Companhia Energética de São Paulo	Ilha Solteira-SP	Paraná	3.444.000
Xingó	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Canindé de S. Francisco-SE	São Francisco	3.162.000
Paulo Afonso IV	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Delmiro Gouveia-AL	São Francisco	2.462.400
Itumbiara	Furnas Centrais Elétricas S/A	Itumbiara-GO	Paranaíba	2.124.000
São Simão	Companhia Energética de Minas Gerais	Santa Vitória-MG	Parnaíba	1.710.000
Foz do Areia	Copel Geração S/A	Pinhão-PR	Iguaçu	1.676.000
Jupia	Companhia Energética de São Paulo	Castilho-SP	Paraná	1.551.200
Itaparica	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Glória-BA	São Francisco	1.479.600
Itá	Gerasul e Itá Energética S/A	Itá-SC	Uruguai	1.450.000
Marimbondo	Furnas Centrais Elétricas S/A	Fronteira-MG	Grande	1.440.000
Salto Santiago	Centrais Geradoras do Sul do Brasil S/A	Saudade do Iguaçu-PR	Iguaçu	1.420.000
Porto Primavera	Companhia Energética de São Paulo	Anaurilândia-MS	Paraná	1.400.000
Água Vermelha	AES Tietê S/A	Indiaporã-SP	Grande	1.396.200
Serra da Mesa	Furnas Centrais Elétricas S/A	Cavalcante-GO	Tocantins	1.293.000
Furnas	Furnas Centrais Elétricas S/A	Alpinópolis-MG	Grande	1.270.000
Segredo	Copel Geração S/A	Mangueirinha-PR	Iguaçu	1.260.000
Salto Caxias	Copel Geração S/A	Capitão Leon. Marques-PR	Iguaçu	1.240.000
Emborcação	Companhia Energética de Minas Gerais	Cascalho Rico-MG	Paranaíba	1.192.000
Salto Osório	Centrais Geradoras do Sul do Brasil S/A	Quedas do Iguaçu-PR	Iguaçu	1.078.000
Sobradinho	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	Juazeiro-BA	São Francisco	1.050.300
Estreito	Furnas-Centrais Elétricas S/A	Rifaina-SP	Grande	1.050.000

Fonte: ANEEL, 2002

Quanto às áreas de reservatórios, a Tabela 2.5.3 e a Figura 2.5.2 a seguir mostram os maiores reservatórios de hidrelétricas brasileiras e a densidade de potência de cada um, podendo-se observar que a pior densidade ocorre em Balbina, que inundou uma área de 2.360 km² para gerar apenas 250 MW, enquanto que Itaipu inundou menos de 60% dessa área (1.350 km²) e gera 50 vezes mais (12.600 MW). Estima-se que a área inundada por aproveitamentos hidrelétricos no Brasil seja da ordem de 36.000 km², o equivalente a 0,4% do território nacional (ANEEL, 2002).

Tabela 2.5.3 – Maiores Reservatórios de UHEs Brasileiras

USINA	RIO	POTÊNCIA (MW)	OUTROS USOS	ÁREA DO RESERVATÓRIO (km ²)	DENSIDADE DE POTÊNCIA (MW/Km ²)
Sobradinho	São Francisco	1.050	Irrigação	4.124	0,3
Tucuruí	Tocantins	8.125	Navegação	2.430	3,3
Serra da Mesa	Tocantins	1.275	Regularização	1.784	0,7
Balbina	Uatumã	250	-	2.360	0,1
Ilha Solteira	Paraná	3.444	-	1.195	2,9
Porto Primavera	Paraná	1.814*	Contr.Ch/Nav	2.250	1,2
Itaipu	Paraná	12.600	Contr. Cheias	1.350	9,3
Furnas	Grande	1.216	Regularização	1.440	0,8
Três Marias	São Francisco	396	Contr. Cheias	1.155	0,3

Fonte: ANEEL, 2002

* Potência de Projeto; instalados 1.400 MW

Figura 2.5.2 – Maiores Reservatórios Brasileiros de Hidrelétricas

Fonte: ANEEL, 2002

2.5.2 – Irrigação

Existem quase duas centenas de açudes no Brasil, especialmente no Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Piauí e Bahia. Dentre os que apresentam a função principal de irrigação foram selecionados alguns, a título de exemplo, indicando os usos secundários e áreas dos reservatórios, conforme Tabela 2.5.4 a seguir.

Tabela 2.5.4 – Reservatórios para Irrigação

BARRAGEM	BACIA	USOS SECUNDÁRIOS	ÁREA DO RES (km ²)	UF
Castanhão	Jaguaribe	Controle de Cheias, Geração, Piscicultura, Abastecimento, Turismo	458	CE
Orós	Jaguaribe	Abastecimento, Piscicultura, Geração	350	CE
Açu	Piranhas	Piscicultura	195	RN
Arrojado Lisboa (ex Banabuiú)	Jaguaribe	Controle de Cheias, Piscicultura, Abastecimento, Turismo	98	CE
General Sampaio	Curu	Regularização, Abastecimento e Geração	33	CE
Francisco Sabóia (ex Poça da Cruz)	Moxotó	Piscicultura, Irrigação	56	PE
Eng. Avidos (ex Piranhas)	Piranhas	Controle de Cheias e Piscicultura	28	PB

Fonte: CBDB, 2003 e DNOCS, 1982

2.5.3 – Abastecimento de Água

Dentre as principais barragens construídas com a função principal de abastecimento, tem-se a de Pedra do Cavalo, na Bahia, com 163 km² de área de reservatório, e as dos Sistemas Cantareira e Alto Tietê, na Grande São Paulo. Na Tabela 2.5.5 a seguir tem-se alguns exemplos de represas construídas com a função principal de abastecimento de água, indicando-se também os outros usos associados.

Tabela 2.5.5 – Reservatórios para Abastecimento de Água

SISTEMA	BACIA	REPRESA	USOS SECUNDÁRIOS	ÁREA DO RES. (km ²)	UF
Cantareira	Piracicaba	Jaguari	-	50,0	SP
	Piracicaba	Cachoeira	-	8,7	SP
	Piracicaba	Atibainha	-	22,5	SP
	Baixo Tietê	Juqueri	-	5,5	SP
Alto Tietê	Alto Tietê	Jundiaí	Controle de Cheias	17,4	SP
	Alto Tietê	Ponte Nova	Controle de Cheias	28,1	SP
	Alto Tietê	Taiaçupeba	Controle de Cheias	19,4	SP
	Guarapiranga	Guarapiranga	-	33,4	SP
	Atlântico Sul	Pedra do Cavalo	Controle de Cheias	163,0	BA
	Atlântico Sul	São José	Controle de Cheias	26,0	BA
	Rio Manso/Paraopeba	Rio Manso	-	19,4	SP

Fonte: CBDB, 2003 e DNOCS, 1982

2.5.4 – Controle de Cheias

Exemplos de algumas barragens construídas com o objetivo principal de controle de cheias e regularização constam da Tabela 2.5.6 a seguir.

Tabela 2.5.6 – Reservatórios para Controle de Cheias e Regularização

BARRAGEM	BACIA	USOS SECUNDÁRIOS	ÁREA DO RES (km ²)	UF
Sistema Curema Mãe d'Água	Piranhas	-	97,9	PA
Paulo Sarasate (ex Araras)	Acarau	Perenização, Irrigação, Geração, Piscicultura	96,2	CE
Pereira de Miranda (ex Pentecoste)	Curu	Regularização, Irrigação, Geração, Piscicultura	57,0	CE

Fonte: DNOCS, 1982

2.6 – Comentários

A maioria das grandes barragens existentes no mundo (cerca de 40% do total), tem a função de fornecer água para irrigação. No Brasil também se observa esse quadro, sendo que das 370 barragens cadastradas pelo CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens), cerca de 180 têm, como função principal, a irrigação. A seguir, segundo a mesma fonte, tem-se 155 barragens para geração hidrelétrica e 24 cuja função principal é o abastecimento de água. São poucas as barragens que tem como função principal os demais usos, como perenização de rios, acumulação, regularização e controle de cheias.

Por outro lado, as maiores barragens e reservatórios atendem à geração de energia. Considerando-se que os impactos sobre o meio ambiente aumentam de forma acentuada com o tamanho do reservatório, pode-se concluir que as barragens com essa função devam merecer as maiores atenções no âmbito dessa dissertação.

CAPÍTULO 3 – IMPACTOS DE BARRAGENS

3.1 – Antecedentes

Nos últimos 30 anos vivenciou-se a trajetória que se iniciou com os primeiros estudos expeditos de avaliação de impactos ambientais (AIA), passando pela estruturação de sistema com bases legal, técnica e institucional sólidas e chegando aos dias atuais, em que se dispõe de vários instrumentos de gestão ambiental, adequados aos diversos empreendimentos e regiões (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Os Estados Unidos foram os precursores da adoção formal da AIA a partir da edição do National Environmental Policy Act (NEPA) em 1969, que começou a vigorar em 1º de janeiro de 1970 (BURSZTYN, 1994 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Até a Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, o entendimento das questões ambientais derivadas da industrialização, limitavam-se à poluição do ar, da água e do solo. Após a conferência a AIA foi incorporada ao processo de decisão de outros países, além dos EUA, como Japão, antiga URSS, Canadá, Alemanha e França. O NEPA e a Conferência de Estocolmo ampliaram o enfoque do meio ambiente, passando a incorporar, além dos aspectos físicos e bióticos, o componente sócio-econômico.

A Comunidade Européia, com seus doze países membros, adotou Diretriz Única para AIA apenas em 1985, portanto, 14 anos após os EUA (ALBUQUERQUE FILHO, 2002), apesar de que em alguns dos países membros já existiam procedimentos formais para avaliação ambiental.

No Brasil, a Política Nacional de Meio Ambiente, estabelecida pela Lei Federal 6938/81 definiu o termo meio ambiente, como sendo “o conjunto de condições, leis, influência e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas” e instituiu a AIA, conforme Apêndice dessa Dissertação.

O impacto ambiental, estabelecido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) em sua Resolução nº 01/86, é “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de

matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais”.

As atividades humanas mencionadas podem ser um projeto de engenharia, um programa, um plano, uma lei ou dispositivos administrativos que se traduzam em implicações ambientais (CONESA FDEZ VÍTORA, 1997 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Na Figura 3.1.1 está representada a influência de uma ação qualquer no meio ambiente.

Figura 3.1.1 – Significado do Impacto Ambiental

Fonte: CONESA FDEZ.VÍTORA, 1997 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002

Outra representação do impacto pode ser observada na Figura 3.1.2, conforme definição proposta por Wathern (WATHERN, 1988 apud SÁNCHEZ; DIAS, 2002). Segundo esse autor, nos processos do meio ambiente não se pode prescindir de sua dimensão dinâmica. Como exemplo da aplicação desse conceito tem-se o seguinte: uma área ocupada por formação vegetal anteriormente alterada por corte seletivo de espécies arbóreas, mas que se encontra em processo de regeneração natural. O estado atual da vegetação pode ser descrito por meio de um indicador ambiental

(biomassa/ha, densidade de árvores acima de um determinado diâmetro, diversidade, etc). Para se avaliar o impacto da derrubada dessa vegetação, segundo o autor, não se deve comparar com a situação atual, cuja importância ecológica pode ainda não ser significativa, mas sim as duas situações hipotéticas futuras.

Figura 3.1.2 – Conceito de Impacto Ambiental segundo Wathern

Fonte: SÁNCHEZ; DIAS, 2002

A identificação dos impactos decorrentes de qualquer ação é complexa, desde a sua delimitação, uma vez que a propagação ocorre no espaço e no tempo por meio de uma complexa rede de inter-relações. Outra dificuldade se refere à natureza diferenciada dos efeitos. Na Tabela 3.1.1 a seguir apresenta-se uma matriz de características dos impactos.

Tabela 3.1.1 – Características dos impactos ambientais

ELEMENTOS DOS IMPACTOS	POSSIBILIDADES
Desencadeamento	Imediato; diferenciado; escalonado
Frequência	Contínua; descontínua; época; ano
Extensão	Pontual; areal-extensivo; linear; espacial
Reversibilidade	Reversível/temporária Irreversível/permanente
Duração	1 ano ou menos; de 1 a 10 anos; de 10 a 50 anos
Magnitude (Escala)	Grande; média; pequena
Importância	Importante; moderada; fraca; desprezível; etc (significado local)
Sentido	Positivo; negativo
Origem	Direta: efeitos primários Indireta: efeitos secundários; terciários; etc
Acumulação	Linear; quadrática; exponencial; etc
Sinergia	Presente; ausente
Distribuição Ônus/Benefícios	Socializados; privatizados

Fonte: SILVA, 1996 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002.

Em 1990 A FEEMA definiu que a AIA deveria ser introduzida no início de qualquer processo e deveria incluir políticas, programas, planos e projetos.

Paralelamente à regulamentação do assunto, ainda na década de 70, vários empreendimentos no Brasil, especialmente usinas hidrelétricas, foram objeto de Avaliação Ambiental Prévia, por exigência dos órgãos financiadores internacionais, obrigando a ELETROBRÁS a instituir, a partir de 1974, procedimentos de AIA prévia para aproveitamentos hidrelétricos. Assim, o primeiro projeto governamental submetido a AIA foi a UHE Sobradinho, na Bahia, financiado pelo Banco Mundial. Nesse estudo os principais aspectos abordados eram os referentes aos componentes bióticos e sócio-econômicos, mas mencionava os elementos do meio físico que deveriam ser melhor estudados.

A resolução CONAMA nº 01/86 (BRASIL, 1986a) estabelece as conceituações, responsabilidades, critérios básicos e as diretrizes gerais para o uso e implementação de AIA, cujas atividades deveriam constar dos documentos EIA e RIMA, condicionadores do licenciamento de um conjunto de atividades modificadoras do meio ambiente, conforme Tabela 3.1.2 a seguir.

Com relação às legislações da Europa e EUA, a brasileira apresenta as seguintes especificidades: estrutura mais descentralizada e exigência de que o EIA seja realizado por equipe multidisciplinar.

Tabela 3.1.2 – Atividades Modificadoras do Meio Ambiente sujeitas à Avaliação de Impacto Ambiental

ATIVIDADE MODIFICADORA (*)	OBSERVAÇÃO
I. Rodovias	Com duas ou mais faixas de rolamento
II. Ferrovias	
III. Portos e Terminais	Terminais de minérios, petróleo e produtos químicos
IV. Aeroportos	Conforme definido no inciso I, artigo 48, Decreto-Lei nº 32 (18/11/66)
V. Dutovias	Oleodutos, gasodutos, minerodutos, troncos coletores e emissários de esgotos
VI. Linhas de Transmissão	Voltagem acima de 230 kV
VII. Obras hidráulicas para exploração de recurso hídrico	Barragem hidrelétrica com potência acima de 10 MW; saneamento; irrigação; abertura de canais para navegação, drenagem e irrigação; retificação de cursos d'água; abertura de barras e embocaduras; transposição de bacias; diques

Tabela 3.1.2 – Atividades Modificadoras do Meio Ambiente sujeitas à Avaliação de Impacto Ambiental – continuação

ATIVIDADE MODIFICADORA (*)	OBSERVAÇÃO
VIII. Extração de combustível fóssil	Petróleo, xisto e carvão
IX. Mineração	Inclui minérios Classe II, definidos no Código de Mineração
X. Processamento e destinação final de resíduos	Resíduos sólidos domésticos e resíduos tóxicos ou perigosos
XI. Usinas de geração de eletricidade	Capacidade acima de 10 MW, independente da fonte primária
XII. Complexo e unidades industriais e agro-industriais	
XIII. Distritos industriais e zonas estritamente industriais	
XIV. Exploração econômica de madeira e lenha	Áreas maiores que 100 ha ou menores, em função da importância ambiental
XV. Projetos urbanísticos	Acima de 100 ha ou em áreas consideradas de relevante interesse por órgão ambiental competente
XVI. Atividades que usam carvão vegetal, derivados ou produtos similares	Para quantidades superiores a 10 t/dia
XVII. Projetos Agropecuários	Áreas maiores que 1.000 ha, ou menores, neste caso quando possui especificidade de importância ambiental

Fonte: BRASIL, 1986a e 1986b

(*) Numeração conforme a fonte

Quanto aos métodos de AIA, o Brasil tem acompanhado o que vem sendo adotado nos outros países, sem inovações (SILVA, 1996 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Na Tabela 3.1.3 a seguir são apresentados os principais métodos utilizados nas AIAs.

Com relação especificamente aos projetos de usinas hidrelétricas, em 1986 a ELETROBRÁS publicou o “Manual de Estudos de efeitos ambientais dos sistemas elétricos”, como resposta às fortes reações e pressões dos meios técnicos, já que as questões sócio-ambientais não vinham sendo adequadamente consideradas no processo de planejamento do setor elétrico. Aliadas às essas pressões, começaram as exigências dos organismos financiadores internacionais, que buscavam atender as questões levantadas pela comunidade dos países desenvolvidos, “que se sentiam responsáveis pelos impactos negativos deflagrados no meio ambiente dos países do terceiro mundo” (SILVA, 1996 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Essa questão é controversa, pois os países desenvolvidos não tem sido tão exigentes quanto às suas próprias questões ambientais.

Tabela 3.1.3 – Síntese e comparação de métodos de Avaliação de Impacto Ambiental

TIPO DE MÉTODO	BREVE DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<i>Ad Hoc</i>	Reunião de especialistas: criação de grupos de trabalho com profissionais de diversas disciplinas.	Avaliações em tempo curto e quando há carência de dados. A legislação vigente no país não permite sua utilização como método de AIA.	Rapidez; Baixo Custo	Não promove análise sistemática dos impactos. Resultados com alto grau de subjetividade e fundamento técnico-científico deficiente.
Listagens de Controle Simples	Listas de fatores ambientais, às vezes associados a parâmetros, e de ações do projeto.	Diagnóstico ambiental da área de influência.	Ajudam a lembrar de todos os fatores ambientais que podem ser afetados, evitando omissões de impactos ambientais relevantes.	Não identificam impactos diretos ou indiretos. Não consideram as características temporais, nem espaciais dos impactos.
Escalares	Listas mais escalas de valores para fatores e impactos, gráfico ou diagrama representando impactos ambientais.	Diagnóstico ambiental; comparação de alternativas.	-	Quase nunca indicam a magnitude dos impactos substituindo-a por símbolos.
Escalares Ponderadas	Como as escalares, incorporando o grau de importância dos impactos.	Diagnóstico ambiental; valoração dos impactos; comparação de alternativas.	-	Resultados subjetivos.
Matrizes de Interação	Listagens de controle bidimensionais, dispondo nas linhas os fatores ambientais e nas colunas as ações do projeto. Cada célula de interseção representa a relação de causa e efeito geradora do impacto.	Identificação dos impactos ambientais diretos.	Boa disposição visual do conjunto de impactos diretos. Simplicidade de elaboração. Baixo custo.	Não identificam impactos indiretos. Não consideram as características espaciais dos impactos. Subjetividade na atribuição da magnitude, usando valores simbólicos para expressá-la.
Redes de Interação	Cadeias de impactos gerados pelas ações do projeto.	Identificação dos impactos ambientais diretos e indiretos (secundários, terciários, etc.)	Abordagem integrada na análise dos impactos e suas interações. Facilidade de troca de informações entre disciplinas.	Não destacam importância relativa dos impactos. Não consideram aspectos temporais e espaciais dos impactos. Não atendem às demais etapas do EIA. Não prevêem cálculo da magnitude. Não consideram a dinâmica dos sistemas ambientais.
Superposição de Cartas	Preparação de cartas temáticas em transparência: síntese das interações dos fatores ambientais por superposição das cartas ou processamento no computador	Projetos lineares - escolha de alternativas de menor impacto. Diagnóstico ambiental.	Boa disposição visual; dados mapeáveis.	Subjetividade dos resultados. Não quantifica a magnitude dos impactos. Não admite fatores ambientais não mapeáveis; difícil integração de impactos sócio-econômicos. Não atende às demais etapas do EIA. Não considera a dinâmica dos sistemas ambientais.
Modelos de Simulação	Modelos matemáticos computadorizados que representam o funcionamento dos sistemas ambientais	Diagnóstico e prognósticos da qualidade ambiental da área de influência. Comparação de alternativas - cenários. Projetos de grande porte.	Considera a dinâmica dos sistemas ambientais, interação entre fatores e impactos, variável temporal. Promovem troca de informações e interações das disciplinas. Tratamento organizado de grande número de variáveis qualitativas e quantitativas.	Representação de imperfeita qualidade. Custo elevado. Uso de computadores.

Fonte: SILVA, 1996 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002

A Resolução CONAMA nº 1 já listava barragens para fins hidrelétricos com mais de 10 MW como atividade modificadora subordinada à elaboração de EIA/RIMA e a processo de AIA para obtenção de licenciamento. A seguir, em 16/09/1987, foi publicada a Resolução CONAMA nº 06 que regulamentou a exigência de três licenças: Licença Prévia (LP), a ser requerida no início do estudo de viabilidade, Licença de Instalação (LI), a ser solicitada antes da licitação das obras e a Licença de Operação (LO), a ser obtida antes do fechamento e da operação da barragem.

Atualmente, as fases em que se desenvolvem os EIA dos projetos de aproveitamentos hidrelétricos e os respectivos produtos são (JENSEN, 2002):

- Caracterização do Empreendimento;
- Diagnóstico Ambiental dos Meios Físico, Biótico e Sócio-econômico;
- Avaliação dos Impactos;
- Programas Ambientais, Prognósticos e Conclusões;
- RIMA – Relatório de Impactos no Meio Ambiente.

3.2 – Conseqüências da Construção de Barragens

A construção de barragens e a formação de reservatórios contribuíram para o crescimento econômico no Século XX, mas também trouxeram alguns inconvenientes, alterando o equilíbrio estabelecido e induzindo reações do meio para se adaptar às novas condições. As conseqüências da construção de barragens são tanto positivas quanto negativas e seus efeitos variam em duração, escala e grau de reversibilidade.

Dentre as conseqüências positivas, tem-se que as barragens constituem um importante meio para a obtenção de água e energia e agregam inúmeros outros benefícios, dentre eles o desenvolvimento regional e a criação de empregos, tanto na agricultura, pela irrigação das terras, quanto nas indústrias que dependem de suas águas. Promovem também um aumento de renda com o lucro das exportações dos excedentes agrícolas, de produtos industrializados ou da própria eletricidade. Outros

benefícios são a redução dos danos provocados por enchentes e inundações, o surgimento de novas rodovias e hidrovias, eletrificação rural, fixação da população na região, além de outras formas de melhoria.

Países com grande potencial hidrelétrico, como o Canadá, a Noruega, o Brasil e regiões da Rússia, construíram grandes barragens para geração de energia. Países em regiões semi-áridas, como a África do Sul, Austrália e Espanha construíram grandes barragens com o propósito de atender a demanda de água para abastecimento e como segurança quanto ao risco de secas. Na Espanha, por exemplo, as chuvas variam muito de uma estação para outra, e mesmo de um ano para outro. Por outro lado, no este e sudeste da Ásia, onde, nas estações chuvosas, os rios apresentam vazões superiores a 10 vezes as vazões das estações secas, grandes barragens foram construídas para controlar as cheias, armazenando as águas nas épocas chuvosas e liberando-as nas secas.

Além desses benefícios, os reservatórios promovem um aumento do potencial de pesca e também de navegação, já que submergem afloramentos rochosos e bancos de areia existentes no rio. As barragens propiciam o surgimento de atividades de recreação e purificam as águas reservadas.

Se, por um lado, grandes barragens trazem benefícios significativos à humanidade, elevando o nível de vida e de desenvolvimento dos países, por outro causam impactos sociais e ambientais que representam custos (tangíveis e intangíveis) para a sociedade. Por conta desses impactos, as barragens têm sido vítimas das críticas mais severas dos ambientalistas, comparadas com outras obras de infra-estrutura. E essas críticas afetam principalmente os países em desenvolvimento, já que nos países ricos as grandes obras de barramento já foram executadas, nos locais técnica e economicamente mais favoráveis.

Portanto, a questão da necessidade crescente de água e energia nos países em desenvolvimento tem sido confrontada com toda sorte de críticas e entraves ambientais, que impedem ou atrasam a implantação das obras nos rios.

O impasse entre o desenvolvimento e a questão ambiental se aprofundou por falta de dados precisos, obtidos por meio de um monitoramento contínuo dos custos e

benefícios sociais, econômicos e ambientais efetivos das grandes barragens já implantadas. Considerando que grandes barragens ainda poderão ser construídas na América Latina, Ásia e África, a questão deverá ser atacada em duas frentes:

- Melhorar o desempenho das barragens, maximizando os benefícios para a sociedade e a taxa de retorno dos investimentos;
- Avaliar corretamente os custos ambientais dos projetos e implantar medidas adequadas, que os minimizem ou eliminem.

Dentre as consequências negativas freqüentemente citadas das obras de barramento tem-se a inundação de extensas áreas, às vezes urbanizadas, produtivas e/ou de grande diversidade biológica, exigindo o reassentamento de grandes contingentes de pessoas.

A população deslocada de suas moradias devido à construção de grandes barragens ao redor do mundo atingiu entre 40 e 80 milhões de pessoas, sendo que grande parte desse total não foi reassentada (WCD, 2000). O impacto social varia de região para região, em função da densidade demográfica da bacia. Assim, uma barragem no rio Ganges (Índia) ou no Yangtzé (China) trarão um impacto maior, já que a densidade populacional é de 375 e 224 pessoas/km², respectivamente. Na bacia do rio Mun/Mekong, na Tailândia, essa densidade é de 78 pessoas/km² e nos rios Tocantins e Amazonas (Brasil) é de 6 pessoas/km² (WCD, 2000).

No Brasil, o MAB – Movimento dos Atingidos por Barragens, organização não governamental integrada por famílias de diversas regiões, acusa a política de desapropriação das terras pela transformação dos atingidos em indivíduos sem-terra ou indigentes urbanos, em função da inadequação dos reassentamentos às atividades prévias dos desapropriados ou da compensação insuficiente (MELLO, 1999 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Outra queixa comum diz respeito ao suprimento de energia seletivo, que não atende à população desapropriada pelas hidrelétricas.

A construção de barragens intensifica os fluxos migratórios, inicialmente atraindo mão de obra e, depois do encerramento das atividades, dispensando o contingente de operários. Junte-se a isso o reassentamento dos atingidos pelo reservatório e tem-se,

como consequência, o agravamento de doenças sexualmente transmissíveis, aumento do número de acidentes, violência, etc.

As comunidades ribeirinhas a jusante da barragem também são afetadas, já que seu meio de subsistência e acesso aos recursos do rio são afetados em vários graus pela alteração do escoamento do rio e da fragmentação do ecossistema. Em alguns casos, comunidades inteiras são privadas do acesso aos recursos naturais e à herança cultural, pois patrimônios históricos e arqueológicos e terras indígenas podem ser inundados. Como exemplo, cita-se a mobilização promovida pelo governo chinês para diminuir os impactos da UHE de Três Gargantas, que fornecerá 10% de toda a energia demandada no país, 50% a mais que a geração da UHE Itaipu. Seu reservatório será o maior do mundo, com 600 km de extensão, exigindo a remoção de 118 monumentos históricos, que datam de até 4 séculos, e inundando cerca de 8.000 sítios arqueológicos, dos quais apenas 244 serão estudados. No caso da UHE de Assuã, no Egito, a formação do Lago Nasser, segundo maior reservatório do mundo, com 500 km de extensão, na década de 60, também exigiu uma grande mobilização, para resgate de 14 templos, dentre eles o famoso Abu Simbel (VEJA, 2001 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Os rios são o habitat natural de 40% das espécies de peixes do mundo (WCD, 2000). Com a construção de barragens, algumas espécies de peixes foram extintas ou se encontram ameaçadas. Sabe-se que o peixe é fonte de proteína animal para mais de 1 bilhão de pessoas ao redor do mundo, correspondendo, respectivamente, a 28% e 21% da proteína animal consumida na Ásia e na África (WCD, 2000). Rios suprem cerca de 6% da proteína de peixe consumida globalmente, sendo que em algumas comunidades ribeirinhas, o peixe representa 100% da proteína consumida.

As transformações devidas às barragens não ocorrem apenas nos trechos superior, médio e inferior da bacia, mas também nos estuários, onde o ecossistema é mais complexo. Assim, observa-se intrusão salina, destruição de mangues e perdas de áreas alagadas (“wetlands”) na foz dos rios que foram barrados.

“A formação de reservatórios de acumulação de água e regularização de vazões provoca alterações no regime de escoamento e a formação de microclimas, favorecendo certas espécies (não necessariamente as mais importantes) e

Figura 3.2.1 – Impactos Previstos e Imprevistos no Ecosistema

Fonte: WCD, 2000

prejudicando, ou mesmo extinguindo, outras”. Entre as espécies nocivas à saúde humana que podem ser favorecidas, destacam-se parasitas e transmissores de doenças endêmicas, como a malária e esquistossomose. (ANEEL, 2002)

As hidrelétricas de Akossombo (Gana) e Assuã (Egito) são exemplos de aumento da esquistossomose mansônica que, em ambos os casos, afetou 70% da população local e circunvizinha, entre outros transtornos de ordem hídrica, biológica, cultural, econômica e social. (ANDREAZZI, 1993 apud ANEEL, 2000).

Com o reservatório, o escoamento superficial é afetado, alterando-se a vazão no tempo e no espaço. A criação do espelho d’água aumenta as taxas de evaporação regionais. A incidência dos ventos provoca ondas que podem erodir as margens do reservatório.

A flora poderá ser atingida, pela eliminação ou afogamento de florestas, que irão se decompor, prejudicando a futura qualidade da água do reservatório e da água efluente e ocasionando a formação de gases de efeito estufa.

As espécies da fauna terrestre também são afetadas pelo enchimento do reservatório, que inunda seus habitats naturais. No Japão, uma obra em construção vem sendo periodicamente interrompida para não perturbar a temporada de acasalamento de algumas espécies de aves de rapina (CANALI, 2000 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

O corpo d’água irá aumentar as pressões hidrostáticas sobre o material do leito e poderá induzir sismos

localizados. Também irá alterar a dinâmica dos lençóis subterrâneos, podendo impactar os solos e construções existentes no seu entorno.

Outro perigo, atualmente mais remoto, é o de rompimento de barragens e acidentes correlatos. No caso de Macchu (Índia), o rompimento de uma barragem em 1979 causou a morte de 2.500 pessoas (ELETRONUCLEAR, 2001 apud ANEEL, 2002).

No Brasil há vários exemplos de grandes impactos sócio-ambientais decorrentes de empreendimentos hidrelétricos, como Tucuruí e Balbina, na Amazônia, e Sobradinho, no Nordeste. Os impactos causados pela UHE de Tucuruí, localizada no baixo Tocantins, com 3.960 MW instalados na primeira etapa, atingindo 8.125 MW ao final da segunda fase de motorização, foram vários, alguns previstos e outros não. As obras foram iniciadas em 1976 e a Usina entrou em operação em 1984. Para a formação do reservatório, de 2.430 km², foi necessário deslocar 4.407 famílias.

Os impactos citados, contudo, não devem ser considerados como entraves absolutos à exploração hidroenergética dos potenciais remanescentes. De um lado porque os maiores aproveitamentos já foram realizados; de outro, porque, atualmente, com base nas experiências anteriores acumuladas, sabe-se que muitos dos impactos podem ser evitados por meio de estudos prévios. E os que são inevitáveis podem ser devidamente mitigados ou compensados pelos impactos positivos dos barramentos, como oferta de energia e de água para abastecimento urbano e industrial e para irrigação, contenção de cheias, transporte hidroviário, turismo, recreação, etc, ou por ações específicas de compensação, como a criação de Estações Ecológicas.

A incorporação da variável ambiental ao planejamento do setor elétrico tem sido estendida às obras mais antigas, executadas no passado sem essa preocupação, e que agora estão sendo objeto de ações de mitigação dos impactos remanescentes.

De fato, a evolução do conhecimento e antecipação dos impactos causados por barragens vem se aprimorando ao longo das décadas, conforme se observa na Figura 3.2.1 acima. Isso se deve aos Estudos de Impacto Ambiental, que agora são exigidos para todos os empreendimentos em rios, desde as fases iniciais de planejamento, conforme apresentado no item 3.1.

3.3 – Classificação dos Impactos

Os impactos de barragens, sejam elas para geração de energia ou outras finalidades, podem ser classificados em impactos de primeira, segunda e terceira ordem, além dos impactos cumulativos. Podem ser classificados também como impactos no meio físico, no meio biótico ou no meio sócio econômico e pelas suas características específicas. A Figura 3.3.1 a seguir mostra a hierarquização dos efeitos provocados por barragens.

“A partir da mudança física causada pela construção da barragem e enchimento do lago, efeitos de primeira ordem, que se iniciam com o fechamento da barragem, são os de alteração do regime de vazões, de transporte de sedimentos, da qualidade da água e das espécies planctônicas. Os efeitos de segunda ordem resultam das conseqüências dos de primeira ordem e podem ser as alterações na produtividade primária após a formação do lago e as alterações nas características do canal a jusante. Esses impactos requerem períodos por vezes longos, de até 100 anos, para que uma nova forma de equilíbrio seja encontrada. Os impactos de terceira ordem refletirão as conseqüências conjuntas de todos os impactos de primeira e segunda ordem, e se farão sentir sobre as cadeias alimentares. Haverá um ajustamento das espécies às novas condições físicas do local”. (PORTO, 1991).

Figura 3.3.1 – Seqüência das Alterações Causadas pela Construção de Barragens em Rios

Fonte: PETTS, 1984 apud PORTO, 1991

Os impactos cumulativos ocorrem quando se tem barramentos sucessivos num mesmo rio, causando maior fragmentação do seu ecossistema. Os barramentos afetam tanto as variáveis físicas, como o regime de escoamento e a qualidade da água, quanto a produtividade e a composição das espécies nativas. Os impactos cumulativos também ocorrem quando se transfere água de uma bacia para outra, pois freqüentemente envolve a transferência de espécies. A construção de barragens sucessivas com o objetivo de armazenar água para irrigação pode fazer secar trechos de rios ou reduzir muito as vazões nas épocas de estiagem, aumentando a salinidade da água próximo aos estuários. Também pode comprometer a recuperação dos parâmetros de qualidade da água, como nível de oxigênio e, principalmente, temperatura e quantidade de gases dissolvidos, além de agravar o problema de migração de peixes.

Os principais problemas ambientais decorrentes da construção de barragens (CANTER; VLACHOS, 1991 e outras) são:

a) Impactos no Meio Físico:

- alteração do regime de vazões;
- erosão das margens do canal de jusante;
- mudanças no estuário, erosão nos deltas;
- erosão e instabilidade dos taludes marginais do reservatório;
- alteração do nível do lençol freático;
- alterações do microclima regional;
- impactos nas características geológicas e sismológicas;
- impactos na capacidade de uso das terras.

b) Impactos no Meio Aquático:

- transformação do meio hídrico de lótico para lântico;

- alteração na qualidade, no teor de matéria orgânica e nutrientes da vazão efluente;
- alteração no transporte e concentração de sedimentos;
- alteração da condutividade;
- alteração da temperatura da água e da estrutura térmica vertical no reservatório;
- alteração da qualidade da água pela decomposição da biomassa inundada, eutrofização do reservatório.

c) Impactos sobre os ecossistemas terrestre e aquático:

- inundação e desaparecimento de vegetação terrestre;
- perda de habitats terrestres e morte de animais;
- aumento da biomassa de macrófitas;
- alteração nos habitats aquáticos;
- alteração no trânsito da migração de peixes;
- alteração da ictiofauna;
- alteração da fauna terrestre.

d) Impactos sobre as atividades humanas:

- desordenação territorial;
- inundação de terras férteis e jazidas minerais;
- eliminação de equipamentos disponíveis para atividades sociais, culturais e de lazer;
- alterações de vias terrestres de comunicação e impedimento à navegação;

- alteração da paisagem regional;
- alteração das atividades econômicas da população atingida;
- desaparecimento de sítios arqueológicos;
- rompimento das relações sociais pré-existentes;
- necessidade de relocação de populações;
- aumento de doenças de veiculação hídrica;
- alteração da dinâmica social, econômica, política e ambiental dos grupos indígenas da região.

3.4 – Ações Geradoras de Impactos

As ações geradoras de Impacto Ambiental nas várias etapas do projeto, implantação e operação de obras de barramento em rios são:

- Aquisição de Áreas para Implantação da Barragem e Reservatório
- Adequação de Acessos e Instalação de Canteiro e Acampamento
- Operação do Canteiro e Acampamento
- Abertura e Exploração de Jazidas e Áreas de Empréstimo / Bota-Fora e Limpeza dos Terrenos para implantação das obras
- Desvio do Rio
- Construção da Barragem, Vertedouro, Tomada d'Água e Casa de Força ou outras obras acessórias, como canais de irrigação, aquedutos para abastecimento, etc
- Enchimento do Reservatório
- Conclusão das Obras
- Operação da Barragem

3.5 – Fontes Alternativas de Água e Energia

A obtenção de água e energia através de soluções alternativas à construção de barragens deverá ser cada vez mais estudada, tendo em vista as crescentes necessidades das populações e as restrições às obras em rios. Em alguns países, em especial os mais desenvolvidos, praticamente já não se consegue construir novas usinas hidrelétricas pelas seguintes razões: inexistência de locais viáveis, pois os melhores já foram explorados, alta taxa de ocupação dos solos, preço elevado das terras e pressões de natureza ambiental.

Nesses países a solução está em procurar outras fontes de água e energia, na repotenciação das UHEs existentes e na conservação de água e energia (DONADON, 1999). Algumas das diversas fontes alternativas disponíveis atualmente, trazem barreiras que dificultam sua utilização indiscriminada. Os obstáculos podem ser intrínsecos a uma determinada solução, como o alto custo da tecnologia, ou podem ser específicos de um contexto em particular, como o baixo potencial de ventos do local (WCD, 2000).

As fontes alternativas para obtenção de água e energia também apresentam impactos ambientais, conforme descrito a seguir, e que às vezes são muito mais danosos que os das barragens.

3.5.1 – Abastecimento de Água ou Irrigação por Captação do Lençol Subterrâneo

Os impactos causados ao lençol subterrâneo podem ser decorrentes da vazão retirada que, se exceder a capacidade de recarga do lençol, leva ao rebaixamento do NA e, conseqüentemente, ao comprometimento de outras captações, da agricultura e dos próprios sistemas de drenagem superficiais naturais. Além de possibilitar a intrusão salina em aquíferos costeiros e a contaminação do lençol, que ocorre quando o poço de captação é construído de forma ou em local inadequado.

Em países onde os recursos subterrâneos são superexplorados e a taxa de recarga é baixa, como em partes da Índia, Paquistão e China, observa-se que o nível do lençol está abaixando entre 1 e 2 m ao ano (WCD, 2000).

O aquíferos subterrâneos são continuamente realimentados por áreas de recarga ou diretamente por precipitações e irrigação, o que, eventualmente, pode resultar em poluição de suas águas. Em casos especiais, para aumentar a disponibilidade de água e resolver problemas localizados, pode ser feita a recarga artificial do aquífero com efluentes tratados (BRAGA et al, 2002). Os principais objetivos da recarga artificial são: prevenir a intrusão salina em aquíferos costeiros; proporcionar tratamento adicional de efluentes para uso futuro; aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis; reservar água para uso futuro e prevenir subsidência do solo.

Em Omã, no Golfo de Omã, e em Salalah, no Mar Árábico, a excessiva extração de água dos aquíferos subterrâneos permitiu a intrusão salina a mais de 10 km de costa e provocou a subsidência dos solos na região costeira. Foi adotada a solução de injeção de efluentes tratados em baterias de poços adequadamente localizados (BRAGA et al, 2002).

O problema de intrusão salina ocorre em Recife, estado de Pernambuco, onde o bombeamento excessivo de água para diversos usos provoca a salinização dos aquíferos. Uma solução é a construção de uma bateria de poços de injeção de efluentes tratados, criando um gradiente hidráulico no sentido do mar e barrando a intrusão salina.

Dependendo das condições hidrogeológicas do local, a recarga pode ser feita também por meio de instalações superficiais de infiltração, que dispensam o tratamento avançado das águas.

Outra possibilidade em discussão atualmente é o reuso da água para diversas finalidades (BRAGA et al, 2002). Dentre elas, usos urbanos para fins não potáveis, como irrigação de parques, jardins, reserva para incêndio, fontes, espelhos d'água, descarga sanitária em banheiros públicos, lavagem de trens e ônibus. O reuso também é indicado na indústria, em torres de resfriamento, caldeiras, construção civil, irrigação de jardins, lavagem de pisos e processos industriais. E também para irrigação, tomando-se as precauções adequadas para se garantir contra os riscos à saúde pública e os impactos sobre o solo.

Segundo BRAGA et al (2002), sistemas de reuso adequadamente planejados e administrados trazem melhorias ambientais e de condições de saúde, dentre as quais: evitam a descarga de esgotos domésticos nos corpos d'água, preservam os recursos subterrâneos, conservam o solo e propiciam o aumento de produção de alimentos e, conseqüentemente, os níveis de saúde, qualidade de vida e condições sociais da população.

3.5.2 – Energia Solar

O aspecto mais restritivo do aproveitamento da energia solar é a baixa eficiência dos sistemas de conversão, o que faz necessário o uso de grandes áreas para captação de energia. O custo de aquisição das áreas pode comprometer o empreendimento e torná-lo economicamente inviável (ANEEL, 2002).

Contudo, quando se compara com a energia hidráulica, por exemplo, conclui-se que a necessidade de espaço não é tão restritiva. Considerando-se o índice médio global de radiação solar no Brasil, de 1.800 kWh/m².ano, o consumo total de energia em 1998 (300TWh) e uma eficiência de conversão de 12%, seriam necessários 1.400 km² de coletores solares (0,016% do território nacional), o que corresponde a apenas 5% da área alagada por usinas hidrelétricas no Brasil.

3.5.3 – Biomassa

Tal como no caso da Energia Solar, os principais entraves técnico-econômicos ao uso da biomassa para geração de energia elétrica são a baixa eficiência termodinâmica das plantas e os elevados custos de produção e transporte. Além disso, há necessidade de maior gerenciamento do uso e ocupação do solo, devido à falta de regularidade no suprimento (sazonalidade da produção), criação de monoculturas, perda da biodiversidade, uso intensivo de defensivos agrícolas, etc.

No entanto, a biomassa é considerada menos impactante que outras fontes convencionais de energia, tendendo a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas e de comunidades isoladas da rede elétrica, por meio da criação de empregos e geração de receitas.

3.5.4 – Energia Eólica

Os principais impactos de usinas eólicas são do tipo sócio-ambientais, os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros se devem ao ruído dos rotores e os visuais ao agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso das centrais com várias turbinas, conhecidas como fazendas eólicas.

Se, por um lado, ocorre o efeito negativo da alteração da paisagem natural, por outro há uma atração de turistas às usinas, gerando renda, emprego, arrecadação e promovendo o desenvolvimento regional.

Outro impacto negativo das usinas eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados (rádio, televisão, etc). Nos estudos de impacto devem ser avaliadas ainda as rotas de aves, para evitar que as torres possam interferir com elas. (ANEEL, 2002).

3.5.5 – Petróleo

A geração de energia elétrica a partir de derivados de petróleo traz, como principal impacto ambiental, a emissão de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Esses gases são responsáveis por parte das mudanças climáticas ocorridas nas últimas décadas, como o aumento da temperatura média do planeta.

Tanto a queima do petróleo como dos outros combustíveis fósseis - carvão e gás natural - para a geração de energia elétrica, produzem esses gases. Em plantas térmicas, a queima de derivados de petróleo também produz o dióxido de enxofre (SO_2) e material particulado, constituído de pós e cinzas em suspensão. Esses poluentes provocam alterações na biodiversidade local e diversos males à saúde humana, como distúrbios respiratórios, alergias, lesões degenerativas no sistema nervoso e em órgãos vitais, câncer, etc, que se agravam no inverno, quando inversões térmicas provocam o aprisionamento do ar quente e dificultam a dispersão de poluentes.

O material particulado, no entanto, pode ser quase que integralmente removido por meio de equipamentos e filtros, dispositivos a serem previstos nos novos projetos e nas usinas em operação.

Outro impacto a ser considerado é o referente à quantidade de água para resfriamento e o local para descarga dessa água após o processo.

3.5.6 – Carvão Mineral

Os maiores impactos sócio-ambientais dessa fonte de energia decorrem da mineração do carvão, que afeta os recursos hídricos, o solo e o relevo das áreas produtoras. A abertura de poços de acesso e o uso de equipamentos manuais provocam a emissão de óxido de enxofre, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono e outros poluentes. As águas sulfurosas bombeadas das minas, provocam a elevação das concentrações de sulfatos e de ferro e a redução do pH do corpo receptor.

O processo de beneficiamento do carvão gera rejeitos sólidos que são depositados em pilhas ou em barragens de rejeito. A água de chuva, percolando por esses depósitos, transporta materiais poluentes, como pirita, siltito e folhelhos, que vão poluir os córregos, ou então contaminam o lençol freático. As pilhas de material beneficiado ou de rejeito ocupam terras que poderiam estar sendo usadas para agricultura.

Os trabalhadores e moradores das vizinhanças das minas são afetados pela poeira do carvão, que causa doenças respiratórias, como asma, bronquite, enfisema pulmonar e até pneumoconiose.

Além dos impactos da mineração, a queima de carvão em indústrias e termelétricas provoca graves impactos sócio-ambientais, pela emissão de material particulado e de gases poluentes, como o dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Esses gases causam prejuízos à saúde humana e são os principais responsáveis pela formação da chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alteração na biodiversidade e danos materiais, como a corrosão de estruturas metálicas. Há que se considerar também a necessidade de água para resfriamento e o local para sua restituição.

3.5.7 – Gás Natural

O gás natural apresenta vantagens sobre o petróleo e o carvão mineral, por ser menos poluente (menos CO₂ e CH₄) mas seu aproveitamento energético, principalmente como fonte de energia elétrica, também produz impactos.

Um dos maiores problemas é a quantidade de água necessária ao resfriamento de uma central termelétrica a gás. Além do volume de água captada, tem-se as perdas por evaporação e o impacto devido ao despejo de efluentes. A demanda média de água de uma central termelétrica em ciclo a vapor simples é da ordem de 94 m³/MWh e, para ciclos combinados, de 40 m³/MWh (BAJAY et al., 2000 apud ANEEL, 2002).

Com relação à poluição atmosférica, essas usinas emitem óxidos de nitrogênio (NO_x), entre os quais o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o óxido nitroso (N₂O). O NO₂ é um dos principais componentes do “smog” (mistura de fumaça com poluentes e de nevoeiros, que se forma sobre grandes centros urbanos e industriais, sob determinadas condições atmosféricas) e tem efeitos negativos sobre a saúde humana e a vegetação, ainda piores se combinado ao dióxido de enxofre (SO₂), por exemplo. O NO₂ é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa e também contribui com a redução da camada de ozônio.

3.5.8 – Energia Nuclear

A energia nuclear tem sido vista como um perigo de autodestruição, além de uma possibilidade de contaminação do solo, do ar e da água por radionuclídeos. Também usa grande quantidade de água no sistema de resfriamento, provocando o aquecimento das águas do corpo receptor dos efluentes desse sistema. A usina de Angra I, por exemplo, descarrega 30 m³/s de água efluente desse sistema. A água de refrigeração é separada da água e do vapor para geração, para evitar a contaminação por materiais radioativos.

O principal acidente nuclear da História ocorreu em abril de 1986, quando a explosão de um dos quatro reatores da Usina de Chernobyl, na Ucrânia, formou uma nuvem radioativa gigantesca, que cobriu grande parte do território europeu e atingiu milhões

de pessoas. Os danos causados pelo acidente foram incalculáveis e perduram até hoje, através de mutações genéticas e contaminação do solo, vegetação e corpos d'água.

3.5.9 – Energia das Águas Oceânicas

Os recursos energéticos da água do mar são os associados à força das marés, correntes e ondas, diferenças de temperatura e às substâncias químicas dissolvidas. Dessas, a energia das ondas é a mais importante, mas ainda não se têm meios para utilizá-la. Hoje em dia só a maré é utilizada, e mesmo assim, em escala quase experimental (SKINNER; TUREKIAN, 1977). O método de produção da energia hidroelétrica de maré é o mesmo utilizado nas hidroelétricas fluviais: a água flui de um lago para uma cota mais baixa e gira uma turbina. O aspecto complicador desse aproveitamento é que, nas marés, existe fluxo nos dois sentidos e uma curta periodicidade, portanto, a dificuldade prática para a exploração dessa fonte é muito grande.

3.5.10 – Repotenciação das Usinas Existentes (Gestão da Oferta)

A repotenciação consiste na troca de turbinas e geradores ultrapassados por outros mais modernos, reduzindo as perdas hidráulicas, mecânicas e elétricas desses equipamentos. É uma forma de se aumentar a produção de energia sem nenhum investimento adicional nas obras civis ou no reservatório. Portanto, sem agravar os possíveis impactos ambientais causados quando da instalação do Empreendimento.

Segundo estimativas de um fabricante (DONADON, 1999) consegue-se instalar até 30% de potência ou energia adicional nas UHEs mais antigas, mantendo-se inalteradas as características hidráulicas de vazões e desníveis.

3.5.11 – Conservação de Energia (Gestão da Demanda)

A conservação de energia pode ser obtida via modernização de instalações ou via conscientização dos usuários (DONADON, 1999). No primeiro caso, adotam-se medidas como: a substituição de lâmpadas incandescentes por frias, a substituição de equipamentos individuais de condicionamento de ar por instalações centralizadas, a

aplicação de materiais de construção que melhoram o desempenho térmico e a iluminação natural dos ambientes, a automação dos sistemas de elevadores e de iluminação de áreas comuns e de circulação, modernização de eletrodomésticos, etc.

A conscientização dos usuários envolve procedimentos simples de redução e otimização do consumo doméstico, tanto de iluminação, como de uso de chuveiros, ferros elétricos, equipamentos e eletrodomésticos.

Segundo o autor, cada uma dessas vias de conservação de energia poderia significar 30% de economia e, aplicadas simultaneamente, incluindo-se a modernização dos motores elétricos e demais equipamentos industriais, resultaria, em teoria, em 50% de economia global de energia.

3.5.12 – Comentários

As opções para satisfazer as atuais necessidades de energia, água e alimentos, sem que se recorra a novas barragens, inclui uma vasta gama de possibilidades, iniciando-se pela gestão da demanda, através da redução de consumo de água e energia, reuso da água e aumento da eficiência nas instalações e equipamentos do consumidor final de água e energia.

A melhoria nos sistemas de gestão da produção e distribuição de água e energia, reduzindo perdas e aumentando a eficiência também é desejável. Nesse caso pode-se analisar a possibilidade de recarga artificial de aquíferos.

Outra medida recomendável é a gestão das bacias, através de medidas estruturais e do reflorestamento, como formas de controlar o aporte de sedimentos e as enchentes dos rios, evitando-se a necessidade da construção de barragens com a finalidade de controle de cheias.

No caso de ser necessária a implantação de novas fontes de água e energia, deve-se avaliar as possibilidades de armazenar água de chuva e de geração eólica ou solar, ou outras tecnologias mais adequadas ao local.

Em países como o Brasil e a China, no entanto, em fase de desenvolvimento econômico, e com grande potencial hidráulico ainda disponível, é menor a probabilidade dessas alternativas tecnológicas se mostrarem técnica-economicamente vantajosas. Restará equacionar de forma abrangente a questão ambiental, de modo que, no cômputo final, a construção de novas obras de barramento nos rios traga um resultado positivo a esses países.

CAPÍTULO 4 – IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS

Nesse capítulo são caracterizados os impactos físicos das barragens, em especial os impactos sobre o clima, os sedimentos, os aquíferos, a sismicidade regional, a instabilidade das encostas dos reservatórios e a qualidade da água para, a seguir, no Capítulo 5, serem apresentadas possíveis soluções para eliminar ou minimizar esses impactos.

Com relação às etapas de um EIA – Estudos de Impacto Ambiental – esse Capítulo corresponderia, em linhas gerais, ao Diagnóstico e Avaliação de Impactos de Barragens. Os impactos no meio físico usualmente avaliados constam a seguir, sendo que alguns deles são discutidos em maior profundidade, por serem temas atualmente polêmicos, como é o caso dos gases de efeito estufa, ou por permitirem a regionalização dos dados disponíveis.

4.1 – Estudos de Diagnóstico Ambiental

A construção de barragens acarreta diversos impactos nos Meios Físico, Biótico e Sócio-econômico. Esses impactos são definidos a partir dos Estudos de Diagnóstico dos Meios. No caso do Meio Físico, em especial, os estudos de diagnóstico das áreas afetadas são divididos nas seguintes especialidades:

- Clima
- Recursos Hídricos
- Geologia
- Geomorfologia
- Pedologia

4.1.1 – Clima

A caracterização climática da região deve englobar a Dinâmica Atmosférica, incluindo os sistemas atuantes, como a circulação de grande escala, os sistemas frontais, as linhas de instabilidade e os setores climáticos observados na bacia.

Deve englobar a caracterização macroclimática da região, através da análise de dados de precipitação dos postos pluviométricos locais, da temperatura, evaporação, ventos, umidade, insolação e balanço hídrico da bacia a montante da barragem.

4.1.2 – Recursos Hídricos

Na caracterização hidrológica da área em estudo é feita a descrição da bacia hidrográfica sob os aspectos fisiográficos, geomorfológicos e fitopedológicos. A disponibilidade hídrica da bacia é definida com base nos dados de vazões médias diárias dos postos fluviométricos localizados nos afluentes e no rio principal.

No âmbito de Estudos de Diagnóstico também deve ser analisado o transporte de sedimentos nas calhas fluviais, identificando-se as principais fontes e locais de deposição e, se possível, a qualidade da água superficial. Devem ser listados os principais usos das águas superficiais.

4.1.3 – Geologia

Os estudos geológicos com vistas à caracterização da área devem abranger a Geologia Regional, englobando os aspectos litoestratigráficos e estruturais, a Sismicidade e suas relações com a tectônica, de forma a obter a avaliação do potencial sísmico e o risco de sismicidade induzida e a Hidrogeologia. Nos estudos hidrogeológicos deverão ser feitas a identificação e caracterização das unidades aquíferas e avaliação das variações e elevações do lençol freático devidas ao reservatório, bem como seus reflexos em fenômenos como o de instabilidade de encostas e vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação. Devem ser caracterizadas as áreas de alimentação dos aquíferos e seus usos principais. Deverão ser identificadas áreas de risco de deslizamento e/ou desmoronamento com base nas condições geotécnicas dos solos e rochas locais e a possibilidade de fugas d'água. Os estudos devem contemplar a estabilidade do leito do rio e margens a jusante do barramento, considerando a redução do transporte de sedimentos, e devem avaliar o potencial mineral da área de influência e da área de inundação.

4.1.4 – Geomorfologia

Os estudos geomorfológicos para caracterização da área devem englobar a compartimentação do relevo, o estudo dos tipos de relevo, os processos morfogenéticos e a dinâmica superficial, com indicação da presença de erosão ou propensão a assoreamento. Devem indicar também os aspectos relevantes do relevo e sua importância para o Empreendimento.

4.1.5 – Pedologia e Aptidão Agrícola

Nos estudos de pedologia devem ser avaliados os tipos de solos existentes na área e sua gênese, o potencial e a aptidão do uso agrícola desses solos e seu grau de erodibilidade.

4.1.6 – Análise Integrada

Após os diagnósticos de cada meio será elaborada uma síntese que caracterize a área de influência do Empreendimento de forma global, com as principais inter-relações dos meios físico, biótico e sócio-econômico.

Além das condições ambientais atuais será apresentada a tendência evolutiva, explicitando as relações de dependência e/ou de sinergia entre os fatores ambientais, de forma a se compreender a estrutura e a dinâmica ambiental da região, contemplando futuros projetos de ocupação. Essa análise terá como objetivo fornecer dados capazes de consubstanciar a identificação e a avaliação dos impactos decorrentes do Empreendimento e a qualidade ambiental futura da região.

4.2 – Avaliação dos Impactos no Meio Físico

Com o panorama resultante da fase de estudos anterior, de Diagnóstico dos Meios Físico, Biótico e Sócio-econômico, são feitas avaliações dos possíveis impactos da construção da barragem e formação do reservatório.

Nessa fase deve-se identificar os impactos benéficos e os adversos do Empreendimento e avaliar a magnitude do impacto, a importância, a ocasião de incidência, se na etapa de implantação ou de operação, se o impacto é imediato ou a

médio/longo prazos, se é temporário, permanente ou cíclico, reversível ou irreversível, local, regional ou estratégico.

Os impactos identificados serão descritos, quantificados, qualificados e classificados de acordo com as possibilidades listadas. Deverá ser adotada a noção de impactos ambientais significativos, ou seja, agregação de impactos e de suas causas, de forma a permitir uma efetiva avaliação dos efeitos do Empreendimento sobre a realidade local.

4.2.1 – Identificação dos Impactos Ambientais

A identificação dos impactos em geral se faz por meio de dois procedimentos paralelos e complementares:

- a confecção de redes de interação;
- o preenchimento da matriz de interferências.

As redes de interação são apresentadas em forma de tabelas para cada ação do empreendimento. Nas tabelas são estabelecidas relações de causa-efeito, sem nenhuma qualificação ou hierarquização, apenas com a relação de causalidade.

Os impactos são de até terceira ordem mas, em alguns casos, a importância dos impactos provocados se limita à análise de primeira ou segunda ordem.

A matriz de interferência utiliza as ações geradoras de impactos, apresentadas no item 3.4, e os fatores ambientais, tratados a seguir, neste capítulo.

4.2.2 – Definição dos Fatores Ambientais

Os fatores ambientais são escolhidos por representar componentes do meio ambiente que deverão sofrer transformações com a implantação e operação do empreendimento. Constituem recortes do meio que servem para facilitar a análise dos impactos.

Na sequência, apresentam-se os Fatores Ambientais para o Meio Físico, que é o objeto da presente dissertação.

Com a finalidade de sistematizar a avaliação de impactos, o meio físico é, em geral, subdividido em três fatores interagentes: clima, recursos hídricos e terrenos. O clima é caracterizado através de parâmetros como variações anuais e sazonais, que oscilam ao redor de uma média, a qual define o clima regional e local. Os recursos hídricos também são retratados por parâmetros dinâmicos, como níveis e vazões, variáveis em torno de médias que refletem o regime hidrológico, e por outros parâmetros, mais estáticos, como as características físicas dos canais de escoamento superficial. O comportamento das águas subterrâneas e as alterações dos seus níveis são controlados por parâmetros hidrogeológicos. Os terrenos são compostos por elementos estáticos, na escala temporal do empreendimento, como tipo de solo, relevo e substrato rochoso, submetidos a processos dinâmicos de erosão e a esforços tectônicos, cujos reflexos podem ser observados, principalmente, através de eventos sísmicos e de instabilização de encostas.

a) Clima

A nível local assumem importância a circulação do ar e a orientação do relevo, que interagem com determinados parâmetros meteorológicos, tais como: umidade do ar, vento e nevoeiros.

b) Recursos Hídricos

Os recursos hídricos são, em geral, divididos em dois fatores com características próprias:

– Águas Superficiais

As águas superficiais compreendem o rio principal e os afluentes do trecho afetado. A disponibilidade hídrica desses componentes varia no tempo e no espaço de acordo com as características do ciclo hidrológico, da fisiografia local e das ações antrópicas. Para a caracterização e a avaliação dos impactos nas águas superficiais foram definidos os seguintes fatores:

- **Regime de escoamento:** é descrito com base nas vazões, nas velocidades e nos níveis d'água;

- **Transporte de sedimentos:** depende, fundamentalmente, do regime de escoamento, das características fisiográficas da bacia hidrográfica, do ciclo hidrológico e das ações antrópicas sobre a bacia.
- Águas Subterrâneas

Para a avaliação de impactos nas águas subterrâneas são consideradas as alterações do nível d'água das unidades hidrogeológicas, que ocorrerão com o enchimento do reservatório e com a operação da usina.

As alterações dos **níveis freáticos e dos níveis d'água dos aquíferos confinados** dependem da extensão e continuidade das unidades hidrogeológicas, dos seus parâmetros hidrogeológicos, condutividade hidráulica, armazenamento específico e porosidade efetiva, os quais refletem as características litológicas, granulométricas e estruturais das unidades hidrogeológicas. As alterações dos níveis d'água subterrânea dependem também das condições iniciais e de contorno, ou seja, da situação inicial desse nível d'água, do nível d'água do rio, do nível do reservatório durante o enchimento e operação da usina, da localização dos divisores e das áreas de recarga e descarga das águas subterrâneas.

As alterações dos níveis freáticos e dos níveis d'água dos aquíferos confinados condicionam outros parâmetros, tais como:

- **Disponibilidade da água subterrânea e produtividade dos aquíferos:** são controlados pelos mesmos parâmetros e condições já indicadas no caso de alterações dos níveis d'água subterrâneos. São medidos por vazões, vazões específicas e níveis estáticos e dinâmicos;
- **Formação de áreas úmidas e alagadas:** é controlada pela posição do nível d'água subterrânea e pelo relevo, principalmente;
- **Susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas a partir de fontes de contaminação:** é influenciada, principalmente, pelo tipo de aquífero, estruturas geológicas, constituição litológica e geoquímica,

capacidade de troca catiônica e características de condutividade hidráulica dos aquíferos e da zona não saturada, pelos valores e distribuição das cargas hidráulicas nos aquíferos e zonas não saturadas, pela posição do nível da água subterrânea ou espessura da zona não saturada. Depende também do tipo de contaminantes, se reativos ou não, por exemplo.

As alterações nos níveis dos aquíferos podem contribuir para alterações nos terrenos (tratados no item c) a seguir), como expansividade de solos e rochas e colapsividade de solos de fundações, instabilização/erosão de encostas marginais e sismicidade induzida.

c) Terrenos

Neste trabalho o termo terreno é empregado para representar a parte sólida da superfície da terra, formada pelo substrato rochoso e pelos solos, modelada pelos processos de esculturação do relevo.

Para avaliação dos impactos sobre os terrenos são considerados os seguintes fatores: a estabilidade de terrenos marginais, a sismicidade, o potencial agrícola das terras, o potencial de exploração mineral e os recursos cênicos.

A estabilidade dos terrenos marginais pode ser afetada pelos seguintes fenômenos:

- **Os fenômenos de colapsividade** são influenciados pelos tipos de textura, estrutura, cimentações entre grãos nos solos não saturados. Com a elevação do nível d'água ocorre saturação de parte do solo anteriormente não saturada, o que pode provocar fenômenos de colapso;
- **Os fenômenos de expansividade** de solos e rochas são influenciados pelo conteúdo e tipo de argilo-minerais constituintes. Para a ocorrência de fenômenos de expansão, é necessário o contato da água com os minerais expansivos constituintes de solos e rochas inicialmente não saturados. Portanto, há influência, também, das estruturas geológicas e das condutividades hidráulicas;

- **Os fenômenos de instabilizações e erosões das encostas marginais** são influenciados por fatores como: características das unidades geológico-geotécnicas que recobrem as rochas; declividades das encostas e do topo rochoso subjacente aos materiais de cobertura; orientação das estruturas geológicas presentes nos solos de alteração e nas rochas em relação às encostas; posição do nível d'água nas diferentes unidades geológico-geotécnicas e variação desse nível d'água; presença ou ausência de cobertura vegetal e de suas características; e uso e ocupação do solo de maneira geral, assinalando-se a interferência antrópica, como desmatamentos, construção e relocação de estradas, localização de drenagens superficiais e de suas descargas;
- **A sismicidade induzida** pela formação do reservatório resulta das tensões que se superpõem ao regime de tensões tectônicas pré-existent, diminuindo a resistência e provocando acomodações nos maciços rochosos. Em geral, nos casos de sismos induzidos por reservatórios, os maciços rochosos já se encontram com tensões próximas àquelas de ruptura, antes do enchimento, pois as alterações das tensões resultantes desse enchimento são pequenas em comparação às tensões liberadas pelos sismos naturais. Assim sendo, a análise da sismicidade induzida deve considerar também as ocorrências da sismicidade natural;
- **O potencial agrícola das terras**, entendido como a capacidade de suporte à produção agropecuária, depende da fertilidade e de outras características do solo que, em conjunto com o relevo, determinam a susceptibilidade à erosão e os fatores limitantes à moto-mecanização; depende também, do suprimento de água, do tipo de manejo agrícola e das condições sócio-econômicas. O potencial agrícola é analisado através da elaboração de um mapeamento de tipos de terreno e da realização de análise físico-químicas de amostras dos solos presente na Área Diretamente Afetada;
- **O potencial de exploração mineral** é definido pela disponibilidade dos materiais, como areia, cascalho, argila e outros, ao longo da área a ser inundada;

- **Os recursos cênicos** são representados pela paisagem da área afetada. Os rios e sua planície fluvial, em geral apresentam uma paisagem peculiar, com significativa beleza cênica. O canal do rio pode ser do tipo erosivo, apresentando corredeiras e afloramentos rochosos. As praias, que se formam nas épocas de vazante, podem ser utilizadas para lazer. Os terraços, que as vezes margeiam os rios, podem apresentar uma vegetação diferenciada, que compõem uma paisagem especial.

4.2.3 – Matriz de Interferências

A Matriz de Interferências relaciona, nas colunas, as diversas ações geradoras de impactos e, nas linhas, os fatores ambientais. A interseção desses elementos representa a origem dos impactos. Na Tabela 4.2.1 a seguir é apresentado um exemplo de Matriz de Interferências, com os fatores ambientais dos meios Físico, Biótico e Sócio-econômico.

Do ponto de vista das ações do empreendimento, a Matriz de Interferência permite concluir que, na fase de implantação, o enchimento do reservatório é a ação responsável por impactos em todos os fatores ambientais considerados.

Na fase seguinte, a ação mais importante é a operação da usina, que causa interferências em um grande número de fatores ambientais. Também impactados na fase anterior, esses fatores continuam a sofrer interferências, porém de natureza distinta daquela provocada pela implantação do empreendimento.

Tabela 4.2.1 – Exemplo de Matriz de Interferências

FATORES AMBIENTAIS		AÇÕES	AQUISIÇÃO DE ÁREAS	ADEQUAÇÃO DE ACESSOS E INSTALAÇÃO DO CANTEIRO E ACAMPAMENTO	OPERAÇÃO DO CANTEIRO E DO ACAMPAMENTO	ABERTURA E EXPLORAÇÃO DE ÁREAS DE EMPRÉSTIMO E LIMPEZA DOS TERRENOS	DESVIO DO RIO	CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM, DO VERTEDOURO, TOMADA D'ÁGUA E CASA DE FORÇA	ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO	CONCLUSÃO DAS OBRAS	OPERAÇÃO DA BARRAGEM E DA USINA
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
CLIMA	CLIMA LOCAL								X		X
RECURSOS HÍDRICOS	ÁGUAS SUPERFICIAIS	REGIME DE ESCOAMENTO					X		X		X
		TRANSP. DE SEDIMENTOS				X	X	X	X		X
	ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	NÍVEL DO FREÁTICO E DOS AQUIFÉROS CONFINADOS					X		X		X
TERRENOS	ESTABILIDADE	COLAPSIVIDADE E EXPANSIVIDADE							X		X
		INSTABILIZAÇÕES E EROSÕES		X		X		X	X		X
	SISMICIDADE								X		X
	POTENCIAL AGRÍCOLA DAS TERRAS			X		X	X	X	X		X
	POTENCIAL MINERAL								X		X
	RECURSOS CÊNICOS			X		X	X	X	X		X
VEGETAÇÃO			X	X		X	X		X		X
VERTEBRADOS			X	X		X	X		X		X
LIMNOLOGIA				X	X	X	X		X		X
ICTIOFAUNA				X	X	X	X		X		X
ORGANIZAÇÃO TERRITORIAL			X	X	X	X	X	X	X	X	X
DINÂMICA POPULACIONAL			X	X	X	X	X	X	X	X	
INFRA-ESTRUTURA REGIONAL				X	X	X	X	X	X	X	X
ATIVIDADE ECONÔMICA			X	X	X	X	X	X	X	X	X
CONDIÇÃO DE VIDA DA POPULAÇÃO			X	X	X	X	X	X	X	X	X
SAÚDE PÚBLICA				X	X	X	X	X	X	X	X
PATRIMÔNIO ARQUEOLÓGICO, HISTÓRICO E CULTURAL				X		X	X		X		
ÁREAS INDÍGENAS				X	X		X	X		X	

Fonte: THEMAG, 1996

4.3 – Avaliação dos Impactos

4.3.1 – Clima

A influência de reservatórios sobre o clima regional depende de uma série de fatores, incluindo umidade, temperatura, movimentos das massas de ar e topografia local. Dentre os principais aspectos agravados pela implantação de reservatórios tem-se o aumento da formação de neblina e da umidade do ar nas suas vizinhanças, que podem se mostrar desfavoráveis, caso o reservatório se localize nas proximidades de grandes centros ou de aeroportos. Na Tabela 4.3.1 tem-se um exemplo de avaliação do impacto de um reservatório sobre o clima.

4.3.1.1 – Alterações na Umidade do Ar, Ventos e Nevoeiro

Os possíveis efeitos, esperados sobre o clima local, são analisados separadamente para cada elemento climático, embora na atmosfera se encontrem indissoluvelmente ligados.

a) Umidade do Ar

A ampliação da superfície líquida para a evaporação deverá implicar num aumento do teor de umidade atmosférica.

Deve-se entretanto, considerar que o incremento da umidade do ar depende da ação do vento. Deverá ocorrer, também, um aumento do número de dias com orvalho, principalmente nas manhãs com ventos fracos ou calmaria.

b) Ventos

A mudança na rugosidade da superfície poderá provocar uma alteração local no perfil vertical do vento que, com a diminuição do atrito, tenderá a aumentar as velocidades nas baixas alturas.

Tabela 4.3.1 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Clima

SUB FATOR	AÇÃO ⁽¹⁾	IMPACTOS	ATRIBUTOS					MAGNITUDE			GRAU DE RELEVÂNCIA	INSERÇÃO TERRITORIAL	MEDIDAS MITIGADORAS
			POSIT. OU NEGAT.	PROB. DE OCOR	ALCANCE ESPAC.	DURAÇÃO	REVERS	QUANTIFICAÇÃO		QUALIFICAÇÃO			
								ABSOLUTA	RELATIVA (%)				
CLIMA LOCAL	7 E 9	ALTERAÇÃO DA UMIDADE DO AR, VENTOS E NEVOEIROS	P	C	D	P	I			P	B	RESERVATÓRIO E ENTORNO PRÓXIMO	MONITORA- MENTO

(1) - Ações: 1 - Aquisição de Áreas; 2 - Adequação de acessos e instalação de Canteiro e Acampamento; 3 - Operação do canteiro e do acampamento; 4 - Abertura e exploração de jazidas e área de empréstimo e limpeza de terrenos para implantação das obras; 5 - Desvio do rio; 6 - Construção da Barragem, do vertedouro e da Tomada d'Água e Casa de Força; 7 - Enchimento do reservatório; 8 - Conclusão das obras; 9 - Operação da barragem e da usina.

OBS. Impacto : N - Negativo, P - Positivo;
 Probabilidade de Ocorrência : C - Certa, A - Alta, B - Baixa;
 Alcance Espacial : D - Disperso, L - Localizado;
 Duração : P - Permanente, T - Temporário;
 Reversibilidade : R - Reversível, I - Irreversível;
 Magnitude : P - Pequena, M - Média, G - Grande;
 Grau de Relevância : A - Alto, M - Médio, B - Baixo

Fonte: THEMAG, 1996

c) Nevoeiros

O aumento das taxas de evaporação, aliado à presença de umidade e ao mecanismo de brisas, poderá implicar no incremento local dos nevoeiros noturnos e matinais. Nevoeiros de advecção ou de radiação poderão se intensificar, especialmente durante o inverno, quando o ar mais frio da terra se deslocar sobre a superfície líquida mais aquecida. Caso exista aeroporto na proximidade do lago os nevoeiros podem ser prejudiciais.

Os impactos sobre o clima local podem ser positivos ou negativos, pois as possíveis modificações previstas podem trazer benefícios à região, caso o reservatório se localize numa região de clima seco, no Brasil Central, por exemplo, conforme o da Tabela 4.3.1. Os impactos positivos e negativos, nesse caso, são:

- O aumento da umidade relativa, que deverá melhorar os índices dos meses mais secos, atenuando o efeito das baixas umidades naturais;
- A intensificação dos ventos, que irá melhorar o aspecto de conforto térmico;
- A intensificação dos nevoeiros, que tenderá a provocar interrupção na operação de um eventual aeroporto, restrito todavia, a algumas horas da manhã, principalmente nos meses de abril a setembro.

Caso as modificações esperadas sejam pequenas, o impacto pode ser classificado como de pequena magnitude e baixa relevância.

4.3.1.2 – Gases de Efeito Estufa

a) O Efeito Estufa e as Mudanças Climáticas

“O aquecimento da atmosfera terrestre é um fenômeno natural, resultante da interação de processos naturais de entrada de radiação eletromagnética do Sol (fonte geradora de luz, radiação infravermelha e radiação ultravioleta) e a emissão de radiação térmica da Terra (corpo receptor, dissipador e refletor da energia recebida da fonte geradora)” (SANTOS, 2000).

Com a intensificação das atividades antropogênicas a partir da revolução industrial, verificou-se o aumento de determinados gases na atmosfera, que interagem com a radiação térmica emitida pela Terra. Este fenômeno, denominado inicialmente de Aquecimento Global, foi, mais tarde, chamado de Efeito Estufa, dada a similaridade entre o processo e o que ocorre com as estufas artificiais, construídas pelo homem para o cultivo de plantas e alimentos.

Os processos físicos não são exatamente iguais nos dois casos. Na estufa artificial o desequilíbrio térmico é criado propositalmente, a partir da construção de anteparos que bloqueiam a saída da radiação térmica para a atmosfera. O anteparo, em geral, é feito de vidro ou plástico transparente, que permite a entrada da radiação infravermelha e retém o calor no ambiente. Verifica-se também o fenômeno de convecção do ar retido na estufa.

No caso do Aquecimento Global, a função do anteparo é exercida pela presença de alguns gases na atmosfera terrestre, que permitem a passagem da radiação luminosa e demais radiações do espectro eletromagnético e interagem com a energia térmica reemitida pela Terra para a atmosfera.

Este fenômeno difere de outro, também relacionado com a distribuição da energia solar na ecosfera, o da destruição da camada de ozônio. Essa camada, denominada ozonoesfera, protege a Terra das radiações ultravioletas (UV) provenientes do Sol. O ozônio utiliza a energia dos raios – integralmente no caso dos UVC, parcialmente dos UVB e nada no caso dos UVA, que não são absorvidos pela camada e passam para a Terra – nas reações químicas associadas aos processos de formação e destruição dele mesmo.

b) O Efeito Estufa Natural

A radiação solar aquece a Terra naturalmente. Em termos médios globais a Terra irradia aproximadamente a mesma quantidade de energia que provem do Sol, pois há uma parcela de energia da Terra cuja origem não é solar, como a da fissão nuclear, a geotérmica e a associada à rotação da Terra (SANTOS, 2000).

A radiação da Terra se dá com comprimento de onda longo, da radiação infravermelha, já que quanto mais baixa é a temperatura de um corpo, maior será a tendência de emitir calor na faixa de longo comprimento de onda. O Sol, por sua vez, emite energia com comprimento de onda curto, por ter temperatura superficial da ordem de milhares de graus Celsius.

As moléculas dos gases de efeito estufa interagem muito pouco com a radiação solar, de curto comprimento de onda, porém absorvem parte da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, excitam-se e reemitem a quantidade de energia na forma térmica de volta para a superfície terrestre e para a baixa atmosfera (SANTOS, 2000).

A superfície da Terra irradia para a atmosfera uma média de 390 W/m^2 de energia na forma de radiação infravermelha. Desses 390 W/m^2 , 240 W/m^2 passam pela atmosfera e conseguem chegar ao espaço, enquanto que 150 W/m^2 são absorvidos e reemitidos de volta pelos gases naturais de efeito estufa (SANTOS, 2000). Portanto, o efeito estufa natural pode ser definido como estes 150 W/m^2 de radiação infravermelha que as moléculas dos gases de efeito estufa aprisionam e reemitem para a Terra. Este fenômeno mantém a superfície da Terra naturalmente aquecida em torno de 15°C na média. (IPCC, 1995 apud SANTOS, 2000).

O gás de efeito estufa dominante na atmosfera terrestre é o vapor d'água. Assim, com o céu claro, cerca de 60 a 70% do efeito estufa natural é provocado pelo vapor d'água (IPCC, 1995 apud SANTOS, 2000). As nuvens também exercem um papel importante no equilíbrio térmico do planeta, pois refletem, pelas superfícies brancas, boa parte da radiação solar de volta para o espaço, promovendo um efeito contrário ao das moléculas dos gases de efeito estufa. Em termos gerais, as nuvens têm um efeito de esfriamento de aproximadamente 20 W/m^2 , fruto do balanço entre a energia que refletem em direção ao espaço e a energia que aprisionam (IPCC, 1995 apud SANTOS, 2000).

Além da reflexão da atmosfera (principalmente pelas nuvens), existe a reflexão da superfície da Terra. Este fenômeno, associado ao balanço de energia entre a Terra e o Sol, é denominado Albedo, sendo que o albedo médio situa-se na faixa

de 30%, que significa cerca de 100 W/m^2 de energia do Sol refletida de volta para o espaço. (SANTOS, 2000).

Figura 4.3.1 – Esquema Simplificado do Efeito Estufa

Fonte: UNEP, 1997 apud SANTOS, 2000

A Figura 4.3.1 acima traz um esquema simplificado do balanço de energia entre o Sol e a Terra e o fenômeno do efeito estufa.

c) Mudanças Globais

O efeito estufa recentemente se tornou um dos assuntos preferidos da comunidade técnica internacional, por causar modificações climáticas e outras consequências catastróficas, se não for controlado, tais como: elevação dos níveis d'água dos oceanos, alterações na agricultura, silvicultura, etc, afetando todas as formas de vida do planeta. (BRAGA et al., 2002).

De fato, há uma forte correlação entre o aumento das concentrações de gases de efeito estufa e a temperatura média junto à superfície da Terra. Segundo pesquisas, a temperatura global do planeta adquiriu uma tendência crescente ao longo do último século. Análises dos dados de estações meteorológicas ao redor da Terra sugerem um aumento na temperatura média entre $0,45$ e $0,60^{\circ}\text{C}$, desde o ano de 1850 até 2000. (IPCC, 1995 apud SANTOS, 2000).

Quanto à precipitação, registrou-se aumento médio em torno de 1% sobre os continentes no último século (IPCC, 1995 apud SANTOS, 2000). Este aumento se concentrou nas regiões de alta latitude, enquanto que nas áreas tropicais ocorreu um declínio da precipitação. Caso ocorra, a alteração intensa dos regimes de chuvas e secas pode influenciar muitos processos biológicos, como pragas de insetos, multiplicação de organismos patogênicos, etc.

Outro impacto associado ao aumento da temperatura média é o aumento do nível d'água dos oceanos, devido, principalmente, à expansão própria das águas pelo aquecimento e também ao degelo de calotas polares e geleiras. Segundo alguns especialistas, um aumento descontrolado da temperatura global pode induzir a uma elevação dos níveis dos mares entre 20 e 165 cm, trazendo problemas de erosão litorânea em 70% das costas marítimas do mundo, inundação, danificação de portos e estruturas costeiras, enchentes, destruição de charcos, elevação de lençóis de água, intrusão salina em aquíferos de abastecimento e, até, a submersão total de ilhas, como as Ilhas Maldivas. (BRAGA et al., 2002)

Esta associação de causa e efeitos ainda está em discussão. Uma questão que contradiz esta relação direta é a diminuição da temperatura média global ocorrida entre 1940 e 1965, em plena era industrial. Muitos pesquisadores acreditam que esses fenômenos estão associados a processos oscilatórios de grande período e que os períodos de observação atuais são extremamente curtos para conclusões definitivas. “Estes problemas poderão ser esclarecidos a partir das pesquisas que estão sendo realizadas na Antártica, na Estação Vostok” (BRAGA et al., 2002). As amostras de gelo retiradas em profundidade armazenam informações da atmosfera há milênios. Os dados já analisados, segundo BRAGA et al. (2002), permitem dizer que:

- a composição dos gases na atmosfera vem flutuando ao longo dos últimos 160.000 anos;
- quanto maior é a temperatura da Terra, maior a concentração de dióxido de carbono (gás carbônico - CO₂), mas as mudanças na temperatura são de 5 a 14 vezes maiores que a variação no teor de CO₂;

- o metano (CH_4), que é 20 vezes mais eficiente que o CO_2 na absorção de calor, tem relação direta da concentração com o aumento de temperatura da Terra.

Portanto, ainda deverão ser melhor estudadas as interações complexas entre os vários gases causadores, a dispersão e a quantidade das fontes geradoras, o efeito sinérgico e cumulativo dos elementos químicos na atmosfera e suas consequências para o clima.

d) Principais Gases e Fontes de Emissão

A atmosfera terrestre é composta basicamente por dois gases: 20,95 % de Oxigênio (O_2), 78,11 % de Nitrogênio (N_2), que somados totalizam 99,06 % do seu volume (BRAGA et al., 2002). O Argônio (Ar) ocupa 0,93 % do volume e os restantes 0,01% são constituídos pelos demais gases, inclusive os causadores do efeito estufa. Estes gases têm alto potencial de interação com outros elementos químicos e com a radiação infravermelha.

Os gases de efeito estufa são de origem natural e de origem antropogênica. Como gases provenientes de fontes naturais tem-se o vapor d'água troposférico (H_2O), o mais importante dos gases naturais de efeito estufa, que contribui com 60 a 70% do total, e provem da evapotranspiração, vulcões, etc. A seguir vem o Dióxido de Carbono (CO_2), naturalmente adicionado à atmosfera através das explosões vulcânicas e dos processos de respiração celular dos organismos vivos. Graças a estes mecanismos naturais foi possível manter as condições de temperatura na superfície da Terra ao longo de sua evolução geológica.

Quanto aos gases de efeito estufa de fontes antropogênicas tem-se: novamente o Dióxido de Carbono (CO_2), o Metano (CH_4), os Clorofluorcarbonos (CFCs) e o Óxido Nitroso (N_2O). As fontes geradoras destes gases são as atividades industriais, a produção e a utilização de energia e o desflorestamento associado a queimadas. Assim, segundo SANTOS (2000), tem-se as seguintes fontes geradoras de cada um dos gases mencionados:

- Dióxido de Carbono (CO_2): extração, transformação, transporte e uso final de combustíveis fósseis; desmatamentos associados à queimadas de áreas florestadas;
- Metano (CH_4): produzido através de processos de decomposição anaeróbica ou por combustão incompleta nas mudanças de uso do solo (cultivo de arroz em áreas alagadas, queima da biomassa – florestal e resíduos agrícolas – inundação de áreas florestadas em reservatórios) e áreas naturais pantanosas; criação de animais ruminantes (dejetos e gases expelidos pelo arrotto), utilização energética (produção, armazenagem e queima de carvão mineral, produção e transporte de gás natural);
- Óxido Nitroso (N_2O): desnitrificação dos solos em condições anaeróbicas, combustão, queima da biomassa, utilização de fertilizantes;
- Clorofluorcarbonos (CFCs): atividade industrial, gases refrigerantes (ar condicionado, refrigeradores), aerossóis. Estes gases são também responsáveis pela destruição da camada de ozônio;
- Ozônio (O_3): consequência de reações complexas na alta atmosfera, reação fotoquímica com o Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH_4) e radicais oxidados de nitrogênio (NO_x).

O gás predominante dentre os provenientes de fontes antropogênicas é o Dióxido de Carbono (CO_2), sendo a queima de combustíveis fósseis a maior responsável pela emissão desse gás. Por este motivo o aumento da concentração de CO_2 tem sido maior no hemisfério norte.

Para se ter uma idéia do volume de CO_2 emitido anualmente para a atmosfera, tem-se, com base em dados de 1995 (BRAGA et al., 2002), que a emissão total mundial foi de 22,7 bilhões de toneladas, provenientes, principalmente, da Ásia (36,4 %), Europa (27,5 %) e América do Norte (26 %). Neste mesmo ano o Brasil emitiu 249 milhões de toneladas de CO_2 (1,1 % do total), enquanto que a Floresta Amazônica remove, segundo estimativas do Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais – INPE – 850 milhões de toneladas de carbono por ano (BRAGA et al, 2002).

Na Tabela 4.3.2 a seguir tem-se os principais gases antropogênicos causadores do efeito estufa e a evolução dos seus níveis de concentração em decorrência do aumento da atividade industrial.

Tabela 4.3.2 – Índices de Concentração de Gases de Efeito Estufa

	CO ₂	CH ₄	CFC-11	N ₂ O
Pré-Industrial 1750-1800	280 ppmv	0,8	0	288 ppbv
Nível Atual	353 ppmv	1,72 ppmv	280 pptv	310 ppbv
Taxa Atual de Crescimento	0,50%	0,90%	4%	0,25%
Vida Média na Atmosfera (Anos)	50-200	10	65	150

ppmv=partes por milhão por volume; ppbv=partes por bilhão por volume; pptv=partes por trilhão por volume

Fonte: UNEP, 1997 apud SANTOS, 2000

As previsões de crescimento dos gases de efeito estufa e sua concentração na atmosfera mais comumente utilizadas são as do IPCC – Intergovernamental Panel on Climate Change – criado em 1988. Segundo os cenários apresentados (IPCC, 1992 apud SANTOS, 2000), a concentração atual de CO₂, de 353 ppmv, pode evoluir entre 2 a 7 vezes até o final do século XXI, passando para 720 a 2.500 ppmv de CO₂ na atmosfera. Cerca de 50% deste valor, no cenário mais otimista, de 720 ppmv em 2100, será produzido pelos países em desenvolvimento.

Observa-se que a concentração de gás carbônico é a maior, seguida pela de metano, mas a contribuição destes gases para o Aquecimento Global não é a mesma, já que o metano bloqueia 20 vezes mais calor que o gás carbônico. Em compensação, o tempo de residência do metano na atmosfera é cerca de 10 % do tempo de permanência do CO₂, além do fato de sua concentração ser muito menor (SANTOS, 2000).

O Protocolo de Kyoto, de 1997, ratificado pelo Brasil em 23/07/2002, é um instrumento criado com o objetivo de controlar as emissões de gases de efeito estufa. Este Protocolo estabelece que os países desenvolvidos se comprometam a reduzir as emissões destes gases, de forma a atingirem 5 % de redução sobre os níveis de emissões verificados em 1990. O prazo para que esta meta seja atingida vai até 2008 a 2012.

Uma das formas de se concretizar este objetivo é através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – segundo o qual os países industrializados podem ultrapassar suas cotas de emissões previamente estabelecidas, comprando Certificados de Emissão de países em desenvolvimento, que passam a investir em projetos e programas que capturem Carbono da atmosfera, como florestamentos e plantios em áreas degradadas. Estes projetos não podem ter a finalidade de combustão da madeira plantada. Em outras palavras, o comércio de Certificados pode levar os combustíveis “sujos” a subsidiarem a energia “limpa”.

“O mecanismo poderá apresentar resultados efetivos na redução do aquecimento global, mas evidencia características éticas e morais bastante críticas, pois além de propor soluções principalmente econômicas para um problema que é ambiental, estimula os grandes poluidores a pagar em vez de reduzir as suas emissões” (BRAGA et al, 2002).

e) Geração de Energia Elétrica e Efeito Estufa

As emissões de gases de efeito estufa quando da geração de energia elétrica são de dois tipos principais, segundo SANTOS (2000):

- Emissão de CO₂ proveniente da queima de combustíveis fósseis (óleo combustível, carvão mineral, gás natural), principalmente na operação de usinas termelétricas. São emitidos ainda outros gases destas usinas, como dióxidos de enxofre (SO₂) e de nitrogênio (NO₂), além de material particulado;
- Emissão de CO₂ e CH₄, respectivamente por decomposição aeróbica e anaeróbica da matéria orgânica inundada por reservatórios das usinas

hidrelétricas em regiões florestadas. A alteração do uso do solo correspondente à inundação de áreas é uma grande fonte de emissão de metano, bem como as várzeas naturais e planícies inundáveis dos rios. Outro gás que é emitido pelos reservatórios é o óxido nitroso (N_2O).

Enquanto que o primeiro tipo é largamente conhecido, existindo bibliografia abrangente que permite estimar a emissão de gases de novos projetos, o segundo tipo é pouco documentado até o momento, mas se converteu em tema polêmico, que tem sido manipulado politicamente, atendendo a conveniências não muito claras.

Segundo SANTOS (2000), três fatores são responsáveis pela produção destes gases em reservatórios: a decomposição da vegetação pré-existente, submersa pelo reservatório, a ação de algas primárias, que emitem CO_2 e o acúmulo, nas barragens, de nutrientes orgânicos trazidos pelos rios e pela chuva. Assim, a emissão de gás carbônico e de metano é maior no início da operação do reservatório, mas não se encerra com a decomposição total da vegetação submersa. Há uma renovação constante com a chegada de novos materiais orgânicos trazidos para o reservatório, entre eles o carbono orgânico.

O comportamento da concentração de gases em reservatórios ao longo do tempo é o de uma curva com decaimento exponencial da produção durante os primeiros anos após o enchimento, seguida por uma reta, aproximadamente estável no tempo, após a decomposição da biomassa inundada. Já o padrão de emissão de gás carbônico de uma planta térmica é uniforme ao longo da vida útil do empreendimento.

Hoje ainda existem muitas incertezas a respeito das emissões de gases de efeito estufa de reservatórios. Recentemente foram feitas medições das emissões de gases em reservatórios e lagos naturais, mas não se dispõe de dados das emissões dos habitats naturais não perturbados, em situação anterior à criação dos reservatórios.

Sabe-se que habitats naturais também podem emitir gases de efeito estufa. Podem, por outro lado, armazenar ou agir como sumidouro de carbono. Uma floresta tropical de planície inundável na Amazônia, por exemplo, pode emitir metano do solo e, ao mesmo tempo, absorver gás carbônico nas folhas. O balanço de todos estes efeitos potencialmente contrários pode determinar o perfil da emissão de gases de efeito estufa na condições naturais.

Na Tabela 4.3.3 e Figura 4.3.2 a seguir, apresentam-se resultados de emissões de gases em ecossistemas naturais, sendo que, na figura, as emissões foram totalizadas em CO₂ equivalente, multiplicando-se as emissões de CH₄ pelo fator GWP – “Global Warming Potencial” – de 21. Esse índice foi criado para expressar a contribuição efetiva de cada substância ao aquecimento global, em função do seu peso molecular, do seu tempo de permanência médio na atmosfera e do seu efeito de aquecimento cumulativo. É expresso como a integral, no tempo, do forçamento radiativo da emissão instantânea de 1 kg de gás em relação à mesma integral de um gás tomado como referência; em geral adota-se o CO₂ como referência (SANTOS, 2000).

Tabela 4.3.3 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais e Outros

ECOSSISTEMA	TAXA MÉDIA DE EMISSÃO (mg/m ² x dia)	FONTE
Planícies Inundáveis da Amazônica	Floresta alagada: CH ₄ = 100 Lagos: CH ₄ = 120 Alagados com cobertura vegetal: CH ₄ = 787	DEVOL et al, 1988 apud SANTOS, 2000
Planícies Inundáveis Tropicais (Amazônia e África)	Floresta alagada: CH ₄ = 7,5 a 967 Alagados com cobertura vegetal: CH ₄ = 200	BATLETT et al 1993 apud SANTOS, 2000
Campos de Arroz da Indonésia	CH ₄ = 312	HUSIN et al 1995 apud WCD, THEMATIC REVIEW II
Aterro Sanitário	CH ₄ = 6400	HUVED et al 1995 apud WCD THEMATIC REVIEW II
Lagos Naturais Canadenses	Referência para reservatório Gouin: CO ₂ = 1700 CH ₄ = 9,4 Referência para reservatório Manic 5: CO ₂ = 1010 CH ₄ = 2,2 Brome: CO ₂ = 1360 CH ₄ = 11,5 St. Louis (rio St. Lawrence): CO ₂ = 2.090 CH ₄ = 36,5 Croche: CO ₂ = 730 CH ₄ = 9,3	DUCHEMIN et al, 1999 apud SANTOS, 2000

Figura 4.3.2 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais comparados com cultura de arroz e aterro sanitário

Fonte: WCD, 2000 (adaptada)

Conforme se observa, habitats naturais podem ser fonte ou sumidouro de carbono. As planícies inundáveis da Amazônia e os campos de turfa do Norte tem emissões do mesmo nível que as dos lagos naturais americanos e canadenses, enquanto que as florestas tropicais e boreais atuam como consumidoras de carbono. Os campos de arroz da Indonésia, por sua vez, emitem cerca de $2.390 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \times \text{ano}$ e aterros sanitários são responsáveis por $49.060 \text{ g CO}_2/\text{m}^2 \times \text{ano}$.

Quanto às florestas, existem hoje pesquisadores que questionam sua eficiência como sumidouro de carbono, em oposição a ecossistemas aquáticos, tidos como fontes de carbono. Argumentam que, no cômputo final, o balanço dos habitats naturais é próximo de zero e não é substancialmente alterado pela construção de barragens.

O entendimento atual das emissões sugere que reservatórios rasos em clima tropical quente emitem mais gases do que reservatórios profundos em clima boreal frio. Em reservatórios com mais de 40 m de profundidade, por exemplo, o metano não consegue subir para a superfície, por causa da pressão da água (SANTOS, 2000).

Segundo alguns estudos disponíveis, reservatórios tropicais rasos e grandes, de hidrelétricas com baixa capacidade instalada, emitem gases em quantidade equivalente à de usinas térmicas de mesma capacidade, ao contrário daquelas com reservatórios pequenos e profundos e com alta capacidade instalada.

Na Tabela 4.3.4 a seguir estão resumidas as características geométricas e de potência de reservatórios tropicais, associadas à maior ou menor produção de gases de efeito estufa.

Tabela 4.3.4 – Características Físicas dos Reservatórios Tropicais que influenciam na Emissão de Gases de Efeito Estufa

PARÂMETRO	BAIXA PRODUÇÃO	ALTA PRODUÇÃO
Densidade de Potência (kW/m ²)	Alta	Baixa
Profundidade do Reservatório	Profundo	Raso
Forma do Reservatório	Canyon	Dendrítico
Tempo de Residência	Curto	Longo
Tamanho da Bacia Hidrográfica	Pequena	Grande
Temperatura	Frio	Quente
Entrada de Nutrientes e Carbono	Baixa	Alta

Fonte: NEWMAN, 2000

Uma das dificuldades no estabelecimento de metodologia para determinar a quantidade de gases de efeito estufa proveniente de reservatórios é que, por exemplo, a emissão de CH₄ (metano) é intimamente relacionada com o tipo de ecossistema que é alagado, sendo que tipos diferentes de vegetais se decompõem de forma diferenciada sob a água, ou ficam mais resistentes à decomposição, pela ausência de oxigênio, do que se estivessem fora da água. A magnitude e o padrão das emissões variam e dependem da densidade da biomassa, tipo da área inundada, da terra, da duração da inundação e da profundidade do reservatório. Na falta de maiores informações, tem sido utilizadas nas estimativas a média global de emissão de CH₄ em lagos naturais, de 43 mg CH₄/m²xdia, que corresponde à massa de Carbono de 32 mg C/m²xdia (ASELMANN; CRUTZEN, 1989 apud SANTOS, 2000).

Um dos primeiros trabalhos disponíveis no Brasil sobre o assunto (BRUCE, 1990 apud SANTOS, 2000) apresentou uma conta aproximada da emissão de carbono com base na densidade desta substância em florestas inundadas, de 155 tC/ha. Com base na potência instalada da usina, resulta o índice de tC/MW, que pode ser comparado com o índice de emissão de uma usina térmica equivalente. Esta metodologia penaliza a alternativa de geração hidrelétrica, já que não contabiliza a parcela da biomassa que pode ser imediatamente decomposta e gaseificada após o enchimento do reservatório, nem a eficiência de cada tecnologia.

Conforme se pode depreender, as mesmas considerações apresentadas para reservatórios de hidrelétricas podem ser estendidas para reservatórios de qualquer outra finalidade. As principais medições de campo relativas às emissões destes gases, no entanto, tem sido feitas em reservatórios de hidrelétricas, como forma de permitir a comparação com as emissões de plantas térmicas de mesma potência. Este parâmetro permite conhecer qual é a economia de emissão de carbono de uma alternativa tecnológica em relação à outra.

As medições de gases de efeito estufa efetuadas até o momento permitem alinhar as seguintes observações que podem ser generalizadas:

- as emissões anuais de CH_4 e CO_2 em lagos dependem da concentração de carbono nas águas da bacia hidrográfica. A presença de carbono na água é grandemente influenciada pela inundação das várzeas dos rios, sendo este carbono naturalmente transportado pelos rios para jusante, como ocorre na Amazônia;
- a concentração de metano aumenta com a profundidade em que se encontrava o sedimento que constitui a amostra;
- a emissão de metano é intensa logo após o degelo de lagos, enquanto que o gás carbônico pode apresentar fluxo positivo ou negativo nesta situação, dependendo das condições de fotossíntese ou respiração biológica do lago;
- lagos eutróficos e rasos apresentam alterações diárias de fluxo de CO_2 na camada limite água-ar, devido às altas taxas de respiração e fotossíntese. Em lagos oligotróficos a concentração de CO_2 na água e no ar tendem ao equilíbrio.

O metano ocorre em forma de bolhas e diluído na água dos reservatórios e emana do fundo do lago por efeito da decomposição da biomassa afogada. Quanto ao CO_2 (dióxido de carbono) é transportado principalmente na direção vertical do lago por difusão molecular, e é gerado a partir da decomposição de material orgânico interno e externo ao reservatório (SANTOS, 2000).

SANTOS (2000) mediu as emissões de gases em sete reservatórios brasileiros, em quatorze campanhas de amostragem, duas em cada reservatório. Os reservatórios selecionados encontram-se na Tabela 4.3.5 e Figura 4.3.3 a seguir e foram escolhidos de modo a cobrir a variação geográfica de latitude do Brasil e assim abranger as diversas condições ambientais existentes. Foram realizadas medições nas áreas de vegetação dominadas pela floresta amazônica e temperaturas médias altas, vegetação de caatinga com clima característico do semi-árido brasileiro, vegetação de cerrado com temperaturas médias altas, vegetação tipo Mata Atlântica e vegetação subtropical com clima marcadamente temperado. Não foi possível precisar as datas de cada uma das campanhas de medição em cada reservatório. SANTOS (2000) também utilizou dados disponíveis dos reservatórios de Serra da Mesa e Itaipu.

Tabela 4.3.5 – Sinopse das Características dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados

USINA	DATA DA AMOSTRAGEM	ANO DE FECHAMENTO	TÉRMINO DO ENCHIMENTO	IDADE DO LAGO (anos)	LATITUDE/ LONGITUDE	TIPO DE VEGETAÇÃO	POTÊNCIA (MW)	ÁREA DO RESERVATÓRIO (km²)	DENSIDADE DE POTÊNCIA (MW/km²)
Miranda	04/1998	03/1997	05/1997	1	18°59'S/ 48°02'W	Cerrado	390	50,6	7,71
Três Marias	04/1998	01/1961		37	18°13'S/ 45°16'W	Cerrado	387,6	1.040	0,37
Barra Bonita	04/1998	06/1962	05/1963	36	22°31'S/ 48°33'W	Mata Atlântica	140,80	312	0,45
Segredo	05/1998	06/1992	09/1992	6	25°47'S/ 52°07'W	Sub-tropical	1.260	82	15,37
Xingó	05/1998	06/1994		4	9°37'S/ 37°46'W	Caatinga	3.000	60	50,00
Samuel	06/1998	11/1988	07/1989	9,6	8°45'S/ 63°28'W	Amazônica	216	559	0,39
Tucuruí *	06/1998	09/1984	03/1985	14	3°45'S/ 49°40'W	Amazônica	3.960	2.430	1,63
Itaipu		1982	1982	18	25°30'S/ 54°30'W	Sub-tropical	12.600	1.350	9,33
Serra da Mesa		09/1996	12/1996	4	13°50'S 49°18'W	Cerrado	1.293	1.754	0,74

* Com a 2ª Etapa de Motorização, a Potência Instalada irá para 8.125 MW e a densidade para 3,34 MW/km²

Fonte: SANTOS, 2000

Figura 4.3.3 – Localização dos Reservatórios Estudados

A metodologia aplicada às medições incluiu a coleta de gases metano e dióxido de carbono em forma de bolhas emanadas do fundo do reservatório, por efeito de sua saturação e de seu crescimento, e dos mesmos gases misturados à água, por difusão molecular, e transportados verticalmente no gradiente do lago. Para a coleta de bolhas foram utilizados 16 funis e para a coleta de gases dissolvidos foram utilizadas câmaras de difusão.

Além dos fatores já reconhecidos como determinantes no regime de emissões de gases, como tipo do reservatório, idade e latitude geográfica, SANTOS (2000) concluiu que novas variáveis também são importantes, dentre elas: profundidade do local, tipo de vegetação inundada, temperatura da água, regime de ventos, intensidade da correnteza e tipo de operação do reservatório, sendo que os lagos sujeitos a deplecionamento do NA, podem desenvolver vegetação nas várzeas expostas do lago, que irão se decompor quando o NA se elevar, aumentando as emissões.

Na Tabela 4.3.6 a seguir são apresentados os valores de CO_2 e CH_4 das duas campanhas de medição, a média dos valores e a latitude dos referidos reservatórios e nas Figuras 4.3.4. a 4.3.7 são apresentados os mesmos valores em forma gráfica.

Tabela 4.3.6 – Médias de Emissões das Campanhas

	LATITUDE	IDADE DO LAGO (anos)	ÁREA RESERVATÓRIO (km ²)	Kg CO ₂ Km ⁻² d ⁻¹			Kg CH ₄ Km ⁻² d ⁻¹		
				1 ^a	2 ^a	Média	1 ^a	2 ^a	média
Tucuruí	4°	14	2.430	10.433	6.516	8.475	209	15	112
Samuel	9°	9,6	559	8.088	5.350	6.719	184	24	104
Xingó	10°	4	60	9.837	2.259	6.048	30	47	38
Três Marias	18°	37	1.040	-137	2.412	1.138	328	65	196
Miranda	19°	1	51	4.980	3.795	4.388	263	45	154
Barra Bonita	23°	36	312	6.434	1.348	3.891	19	25	22
Segredo	26°	6	82	4.789	601	2.695	10	8	9
Balbina *	2°	4	2.360	-	-	-	-	-	60**
Serra da Mesa *	14°	4	1.754	-	-	2.654	-	-	84
Itaipu *	25°	18	1.350	-	-	170	-	-	11

Fonte: SANTOS, 2000

* Fonte: WCD, 2000 – THEMATIC REVIEW II

** Somente emissão de metano por bolhas

Figura 4.3.4 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Bolhas

Fonte: SANTOS, 2000

Figura 4.3.5. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Bolhas

Fonte: SANTOS, 2000

Figura 4.3.6 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Difusão

Fonte: SANTOS, 2000

Figura 4.3.7. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Difusão

Fonte: SANTOS, 2000

Da análise dos dados obtidos por SANTOS (2000), resumidos na Tabela 4.3.6 e nas Figuras 4.3.4 a 4.3.7, pode-se concluir que:

- existem diferenças marcantes entre os resultados das duas campanhas de monitoramento, chegando a quase 20 vezes no caso do CO₂ do reservatório de Três Marias e a quase 14 vezes no caso do CH₄ do reservatório de Tucuruí. As demais diferenças variaram entre 1,25 a 8 vezes. Portanto, fica difícil extrair conclusões com dados tão discrepantes. Seria interessante que o monitoramento fosse estendido, com coletas periódicas ao longo de alguns anos, para se poder eliminar registros atípicos ou corrigir medições incoerentes;
- a emissão de ambos os gases por bolhas ou difusão, com exceção de Três Marias para o CO₂ e de Xingó e Barra Bonita para o CH₄, apresentou uma tendência de decaimento da primeira para a segunda campanha de medição, comportamento de acordo com a tendência geral, pois, a longo prazo, quanto mais antigo o reservatório menor deve ser a emissão de gases. Mas como não se dispõe das datas das campanhas e, aparentemente, elas foram executadas com intervalo de menos de um ano, esse comportamento pode ser consequência dos fatores mencionados no parágrafo anterior, principalmente do tipo de operação do reservatório por ocasião das medições;

- a emissão de dióxido de carbono em bolhas é cerca de 100 vezes menor que a do metano, graças à sua maior solubilidade na água;
- quanto ao outro processo de transporte de gás monitorado, a difusão molecular, observou-se que os valores são bem maiores, tanto para o metano quanto, e principalmente, para o gás carbônico. Cerca de 68% do metano total emitido e praticamente 100% do gás carbônico saem por difusão molecular para a atmosfera. Isto contraria a hipótese inicial do trabalho de SANTOS (2000), de que o metano seria emitido principalmente por bolhas;
- o comportamento das emissões de metano com a idade do reservatório apresentou tendência de redução, conforme esperado, enquanto que o gás carbônico não apresentou um padrão de variação no tempo, observando-se que alguns reservatórios mais antigos apresentam emissões maiores que os mais novos. Esse comportamento confirma que o metano provem da decomposição da biomassa inundada, que se extingue com o passar do tempo, enquanto que o gás carbônico é permanentemente renovado no reservatório, tanto pela produção interna quanto pelo aporte da bacia hidrográfica de montante.

Observa-se que, ordenando-se os reservatórios por ordem crescente de latitude, conforme a Tabela 4.3.6, os valores de CO₂ da campanha de SANTOS (2000) ordenam-se em sentido decrescente, com exceção do reservatório de Três Marias. Este caso pode ser explicado pela situação atípica encontrada na primeira campanha de medição, na qual se registrou uma absorção de -137 mgCO₂/m²xdia, ao invés de emissão de CO₂, provavelmente devida à fotossíntese da produção primária do lago. Mas, de maneira geral, pode-se confirmar que quanto mais próximo o reservatório se encontra do Equador, maior é a taxa de emissão de gás carbônico. Quanto ao metano não ocorre uma correlação razoável com a latitude. Os valores registrados nas duas campanhas apresentam discrepâncias marcantes em alguns casos, como no reservatório de Tucuruí para o metano e no reservatório de Três Marias para o gás carbônico.

Na Tabela 4.3.7 constam as mais poluentes dentre as hidrelétricas pesquisadas quanto ao gás carbônico e ao metano.

Tabela 4.3.7 – Hidrelétricas mais Poluentes

GÁS CARBÔNICO			METANO		
RESERVATÓRIO	IDADE (ano)	EMIÇÃO (kg / km ² x dia)	RESERVATÓRIO	IDADE (ano)	EMIÇÃO (kg / km ² x dia)
Tucuruí (TO)	14	8.475	Três Marias (MG)	37	196
Samuel (RO)	10	6.719	Miranda (MG)	1	154
Xingó (AL)	4	6.048	Tucuruí (TO)	14	112

Fonte: SANTOS, 2000

Com as medições efetuadas por SANTOS (2000) nos reservatórios de hidrelétricas monitorados foram calculadas as Emissões de Carbono Evitadas, por comparação com as emissões de termelétricas de mesma potência, ambas para o horizonte de 100 anos. Ressalte-se que a metodologia aplicada nesses cálculos penaliza as hidrelétricas, pois os resultados das campanhas de medição, que retratam uma situação instantânea, foram projetados como constantes ao longo dos 100 anos, mesmo nos reservatórios novos, que são grandes produtores de gases de efeito estufa, desprezando-se a tendência de decaimento exponencial da produção com a idade do reservatório.

A fórmula geral para a Emissão de Carbono Evitada num tempo “t” é:

$$ECE = B - X \quad (4.1)$$

$$B = a + Gt \quad (4.2)$$

$$X = g + Gn \quad (4.3)$$

Onde:

ECE = emissão de carbono evitada (se ECE>0)

B = emissão total de carbono pela termelétrica

X = emissão total de carbono pela hidrelétrica

a = emissão de C-CO₂ (massa de carbono presente no CO₂) pela termelétrica

$G = \text{GWP} =$ fator de ponderação do C-CH_4 em relação ao C-CO_2 ($\text{GWP} = 8,9$ para $t = 100$ anos, para relacionar as massas de carbono no CH_4 e no CO_2)

$t =$ emissão de C-CH_4 pela termelétrica

$g =$ emissão de C-CO_2 pela hidrelétrica

$n =$ emissão de C-CH_4 pela hidrelétrica

Desprezando-se os termos de segunda ordem, como a emissão de metano pela termelétrica, resulta:

$$\text{ECE} = a - g - \text{Gn} \quad (4.4)$$

Foi também calculado o coeficiente RI (mérito), que mensura quanto cada alternativa tecnológica de usina térmica equivalente contribui para o aquecimento global, relativamente à hidrelétrica:

$$\text{RI} = B / X = \frac{a}{g + \text{Gn}} \quad (4.5)$$

Na Tabela 4.3.8 a seguir tem-se o ranking obtido (SANTOS, 2000), com base no RI das sete hidrelétricas e de quatro alternativas de termelétricas para cada uma delas, em função dos tipos de combustível e eficiência. Admitiu-se, evidentemente, que as alternativas em termelétricas tenham a mesma potência equivalente das hidrelétricas, para permitir a comparação.

Tabela 4.3.8 – Eficiência das Hidrelétricas em Comparação com Termelétricas Virtuais de Potência Equivalente

NOME	RI-NÚMERO DE VEZES	COMBUSTÍVEL E TECNOLOGIA
Xingó	269,83	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Xingó	251,84	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Xingó	215,87	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Segredo	198,52	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Segredo	185,30	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Segredo	158,83	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Xingó	83,95	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Segredo	61,76	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Miranda	35,62	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Miranda	33,25	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Miranda	28,50	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Miranda	11,08	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Tucuruí	5,90	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Tucuruí	5,50	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Tucuruí	4,72	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Barra Bonita	3,84	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Barra Bonita	3,58	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Barra Bonita	3,07	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Três Marias	2,36	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Três Marias	2,20	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Três Marias	1,89	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Tucuruí	1,83	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Samuel	1,57	carvão mineral (ciclo simples 35% eficiência)
Samuel	1,47	óleo diesel (ciclo simples 30% eficiência)
Samuel	1,26	óleo combustível (ciclo simples 35% eficiência)
Barra Bonita	1,19	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Três Marias	0,74	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)
Samuel	0,49	gás natural (ciclo combinado 45% eficiência)

RI = razão entre as emissões de carbono pela termelétrica equivalente e pela hidrelétrica

Fonte: Recalculada com dados obtidos em SANTOS, 2000

Observa-se que existem hidrelétricas muito boas com relação ao coeficiente RI, como as de Xingó, Segredo e Miranda e algumas muito ruins, como Samuel, Três Marias e Barra Bonita. No caso de Samuel e Três Marias, a emissão de gases supera em 100% e 35%, respectivamente, a de termelétricas equivalentes a gás natural de ciclo combinado. Sabe-se, no entanto, que as campanhas de medição nestes dois reservatórios foram influenciadas pelo tipo de operação, com depleção rápida, seguida por nova inundação dos braços dendríticos dos reservatórios, já então colonizados por vegetação terrestre.

As emissões de carbono para os sete reservatórios estudados por SANTOS (2000), obtidas pela média das 2 campanhas de medição e multiplicadas pelas áreas dos reservatórios e por 100 anos, como horizonte para comparação com termelétricas equivalentes constam da Tabela 4.3.9. A emissão total de carbono foi obtida somando-se a massa de carbono contida no metano (C-CH₄), que equivale a 75% da massa total, multiplicada pelo índice GWP de 8,9, à massa de carbono contida no gás carbônico (C-CO₂) que equivale a 27,3% da massa total. Os dados dos três últimos reservatórios constam do WCD, 2000 (THEMATIC REVIEW II).

Tabela 4.3.9 – Produção de Carbono Estimada Durante a Vida Útil dos Reservatórios

RESERVATÓRIO	POTÊNCIA (MW)	DENSIDADE DE POTÊNCIA (MW/km ²)	EMISSIONES DE CARBONO (tC/100 anos)
Miranda	390,00	7,71	4.110.233
Três Marias	387,6	0,37	61.611.400
Barra Bonita	140,8	0,45	13.768.950
Segredo	1.260,0	15,37	2.382.699
Xingó	3.000,0	50	4.173.988
Samuel	216,0	0,39	51.590.096
Tucuruí	3.960/8.125 *	1,63/3,34 *	270.297.753
Balbina	250	0,11	34.363.003
Serra da Mesa	1.293	0,74	82.282.478
Itaipu	12.600	9,33	5.904.870

* 1ª e 2ª Etapas de Motorização

Fonte: Calculada com dados obtidos em SANTOS, 2000 e WCD, 2000

Nas Figuras 4.3.8 e 4.3.9 a seguir constam as emissões de carbono de usinas termelétricas de potências variáveis, com as quatro tecnologias apresentadas na Tabela 4.3.8. As emissões foram calculadas pela equação:

$$\text{Emissão de C} = \frac{c \cdot E \cdot T}{ef} \quad (4.6)$$

onde:

c = relação da produção de carbono com a energia anual gerada;

E = energia anual gerada, em MWh/ano;

T = horizonte de projeto, em anos;

ef = eficiência da termelétrica, em função do combustível e da tecnologia.

A relação da produção de carbono com a energia gerada (c) é de 0,24 para óleo diesel e óleo combustível, 0,30 para carvão e 0,12 para o gás natural de ciclo combinado.

Como o objetivo das Figuras 4.3.8 e 4.3.9 é comparar as emissões das termelétricas com as emissões de hidrelétricas, nos cálculos da energia anual gerada (E) da Equação (4.6), foi adotado o fator de capacidade, que expressa a relação entre a potência média efetivamente utilizada e a potência nominal instalada, de 0,50, usual nas usinas hidrelétricas brasileiras, que operam na ponta e na base.

O horizonte de projeto (T) adotado foi 100 anos e a eficiência da termelétrica (ef) foi admitida a mesma que consta na Tabela 4.3.8, em função do combustível e da tecnologia empregada.

Nas Figuras 4.3.8 e 4.3.9 também foram indicadas as emissões das hidrelétricas monitoradas, conforme Tabela 4.3.9, para o mesmo horizonte de 100 anos, para permitir a comparação entre as tecnologias. Assim, quando se quer comparar, por exemplo, a UHE Tucuruí com térmicas equivalentes, pela Figura 4.3.8 observa-se que as quatro tecnologias de UTEs de mesma potência emitem entre cerca do dobro

da quantidade de carbono, no caso da térmica a gás natural, até quase 6 vezes, no caso da térmica a carvão. Essa situação será sensivelmente melhorada quando for instalada a 2ª Etapa de Motorização. Por outro lado, no caso da UHE Samuel, as emissões do reservatório superam as de uma UTE equivalente a gás natural, mas são inferiores às das demais tecnologias de termelétricas, conforme se constata na Figura 4.3.9.

Figura 4.3.8 – Emissões de Carbono de Usinas Termelétricas e de Reservatórios das Usinas Hidrelétricas Monitoradas

Figura 4.3.9 – Emissões de Carbono de Usinas Termelétricas e de Reservatórios das Usinas Hidrelétricas Monitoradas – Detalhe

Analisando-se as figuras, pode-se observar que, com exceção de Balbina, Três Marias e Samuel, cuja performance foi pior que as de Usinas Termelétricas a gás natural de ciclo combinado de potências equivalentes, os reservatórios das demais UHEs emitem menos carbono que as térmicas, mesmo as de tecnologia/combustível menos poluentes. E isso apesar de se ter adotado um critério de extrapolação de dados para 100 anos que prejudica o desempenho dos reservatórios.

As três hidrelétricas com o pior desempenho são as que apresentam a menor densidade de potência, conforme Tabela 4.3.9, com $0,11 \text{ MW/km}^2$ em Balbina, $0,37 \text{ MW/km}^2$ em Três Marias e $0,39 \text{ MW/km}^2$ em Samuel. Esse parâmetro é um dos que possibilitam prever se uma hidrelétrica será ou não uma grande emissora de gases de efeito estufa, quando comparada com térmicas equivalentes, conforme os diversos autores já citados.

Como exemplo de que quanto maior é o horizonte de projeto melhor se torna a alternativa hidroelétrica e pior se torna a termelétrica, como consequência direta do padrão de emissões entre as duas tecnologias e também do tempo de permanência e do poder de bloquear o calor do metano, quando comparado com o gás carbônico, apresenta-se a seguir um exemplo baseado em cálculos teóricos (WCD, 2000, THEMATIC REVIEW II).

Comparou-se a hidrelétrica de Tucuruí, com 3.960 MW instalados, reservatório de 2.430 km² de área e uma densidade de potência de 1,63 MW/km², com uma termelétrica hipotética equivalente, a óleo combustível. Supôs-se que ambas as plantas gerassem a mesma energia durante 100 anos e que o fator de capacidade da hidrelétrica fosse de 0,50. O metano emitido pelo reservatório foi calculado assumindo que 45% da biomassa inundada, de um total de 226 t/ha de peso seco (FEARNSIDE, 1990 apud WCD, 2000), é carbono, e que 30% desse carbono se decompõe anaerobicamente e decai exponencialmente no tempo, extinguindo-se em torno de 30 anos após o enchimento. O gás carbônico emitido pela termelétrica foi calculado admitindo-se produção de 20 kg C/10⁹ J de óleo e a eficiência térmica de 27,5%.

Na Figura 4.3.10 tem-se as emissões das duas tecnologias. Na Figura 4.3.11 tem-se a quantidade de cada gás que permanece na atmosfera ao longo de 200 anos (ver Tabela 4.3.2). Na Figura 4.3.12 consta o efeito do aquecimento dos dois gases, expresso como o forçamento radiativo integrado da fração de CH₄ e CO₂ que permanece na atmosfera. O efeito do aquecimento devido ao CH₄ se estabiliza em torno de 60 anos, enquanto que do CO₂ continua crescente, mesmo após 200 anos, devendo-se estabilizar apenas após 500 anos (WCD, 2000, THEMATIC REVIEW II).

Na Figura 4.3.13, por fim, é apresentada a relação entre os efeitos de aquecimento do metano e do gás carbônico ao longo de 200 anos. Observa-se que, após cerca de 23 anos de operação, o poder de aquecimento por emissão de gases de efeito estufa do reservatório passa a ser inferior ao de uma termelétrica equivalente. Ou seja, apesar das emissões dos dois gases serem sempre inferiores em magnitude e duração nas hidrelétricas (Figuras 4.3.10 e 4.3.11), como o poder de aquecimento do CH₄ é

superior ao do CO_2 , nos primeiros 23 anos de operação a hidrelétrica teria um desempenho pior que a termelétrica, mas dessa data em diante a situação seria francamente favorável à hidrelétrica.

Figura 4.3.10 – Emissões de CH_4 e CO_2 da UHE Tucuruí e de Térmica equivalente à óleo combustível

Fonte: WCD, 2000 (THEMATIC REVIEW II)

Figura 4.3.11 – Permanência do CH_4 e do CO_2 ao longo do tempo

Fonte: WCD, 2000 (THEMATIC REVIEW II)

Figura 4.3.12 – Forçamento Radiativo do CH_4 (E_4) e do CO_2 (E_2)

Fonte: WCD, 2000 (THEMATIC REVIEW II)

Figura 4.3.13 – Relação $R = E4/E2$

Fonte: WCD, 2000 (THEMATIC REVIEW II)

f) Comentários

Com base nos dados apresentados conclui-se que, apesar de ocorrerem emissões de gases de efeito estufa em reservatórios, em geral sua contribuição para o Aquecimento Global decai exponencialmente com o tempo e é tanto menor quanto maior é o horizonte de projeto, ao contrário da emissão de plantas termelétricas.

Os reservatórios de hidrelétricas, bem como grandes rios e lagos naturais das regiões boreal e temperada, emitem gases de efeito estufa; após cerca de 10 anos, a emissão de gases de reservatórios se assemelha à de lagos naturais situados na mesma região. Nas regiões tropicais os rios, as planícies de inundação e áreas alagadas, em suas condições naturais, são grandes produtores de gases de efeito estufa.

A biomassa inundada não pode, sozinha, explicar as emissões de gases: além dessa fonte, o carbono afluí para o reservatório a partir da bacia hidrográfica contribuinte e até da atmosfera. A barragem impede o escoamento deste carbono para jusante, reduzindo sua concentração em comparação com as condições naturais; segundo GAGNON (2002), contudo, barragens têm um efeito pequeno sobre as emissões globais, porque, virtualmente, todo o carbono que escoar pelo rio, nas condições naturais, tende a ser emitido para a atmosfera, e apenas uma pequena parcela sedimenta permanentemente nos oceanos.

As emissões de reservatórios variam no tempo; as emissões de metano se reduzem com o tempo, enquanto que as emissões de gás carbônico não têm relação com a idade do reservatório.

Um reservatório causa uma mudança líquida na emissão de gases de efeito estufa entre as situações do pré e pós-enchimento e é esta mudança líquida que deve ser avaliada por sua contribuição ao aquecimento global; as medidas de emissões de gases de reservatório disponíveis no momento são de emissões brutas, não são de emissões líquidas, pois não se dispõe de medidas antes da construção da barragem e enchimento do reservatório; além disso, alguns estudiosos (GAGNON, 2002) apontam para o fato de que florestas, sejam tropicais ou temperadas, ao contrário do esperado, são modestas consumidoras de carbono e que a classificação de florestas como sumidouro e superfícies líquidas como fonte de carbono não é precisa, já que o balanço total do carbono na natureza é provavelmente próximo a zero, independente da construção de barragens.

É essencial efetuar estudos de longo termo para medir as emissões durante a vida útil do reservatório, incluindo medições dos gases que passam pelas turbinas e vertedouros; conhecendo-se as emissões de reservatórios será possível comparar a geração hidrelétrica com outras alternativas tecnológicas. Assim, caso o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo comece a ser aplicado e as hidrelétricas se confirmem como alternativa de maior economia de emissões, poderão ser beneficiadas pelos subsídios do mecanismo.

Por fim, o conhecimento do impacto efetivo dos reservatórios no clima evitará que os críticos da geração hidrelétrica continuem fazendo uma interpretação errônea das poucas informações disponíveis.

4.3.1.3 – Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica

O balanço hídrico da bacia em condições naturais, antes da implantação da barragem e do enchimento do reservatório, é caracterizado pela precipitação mensal, pela evapotranspiração potencial mensal e pela capacidade máxima de armazenamento de água no solo. A evapotranspiração potencial é calculada com base nas temperaturas,

no mês e na latitude do posto considerado, segundo a metodologia de Thornthwaite (TUCCI, 1993).

A evapotranspiração real (ETR) é igual à evapotranspiração potencial (ETP), sempre que a precipitação exceder à ETP. Nos meses em que a precipitação se reduz, a ETR iguala a ETP, desde que a soma da precipitação com a água armazenada no solo (capacidade de campo) seja maior ou igual à ETP. Senão a evapotranspiração real será inferior à potencial ($ETR < ETP$).

O balanço hídrico aponta os déficits e as excedências hídricas mês a mês, ao longo do período de observação do posto. Na Figura 4.3.14 a seguir tem-se um exemplo de balanço hídrico, obtido com dados da Estação Porto Nacional, no Estado de Tocantins (THEMAG, 1996).

4.3.1.4 – Evaporações Líquidas nos Reservatórios de UHEs

Reservatórios são sujeitos a perdas d'água por evaporação e evapotranspiração, sendo que o volume perdido nesses processos leva à perdas energéticas nas usinas hidrelétricas ou à redução nos volumes disponíveis para usos consuntivos, como irrigação e abastecimento.

A evaporação líquida de um reservatório é obtida pela diferença entre a evaporação real do reservatório e a evapotranspiração real da bacia hidrográfica no local do reservatório, antes de sua implantação (ONS, 2001):

$$E_l = E_{\text{lago}} - ETR \quad (4.7)$$

onde:

E_l = evaporação líquida, em mm;

E_{lago} = evaporação real do reservatório, em mm;

ETR = evapotranspiração real da bacia, em mm.

Figura 4.3.14 – Balanço Hídrico e Evaporação Líquida em Lajeado

Fonte: THEMAG, 1996

Com a evaporação líquida é possível reconstituir as séries de vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos e efetuar simulações energéticas.

Dos estudos efetuados para os reservatórios de hidrelétricas brasileiras, utilizando dados das Normais Climatológicas 1961 – 1990 e metodologia consagrada para o cálculo da E_{lago} e ETR (MORTON, 1983 a/b apud ONS, 2001), observa-se que a evaporação líquida total anual nos reservatórios é sempre positiva, apesar de existirem meses, em alguns deles, em que a evaporação líquida resulta negativa. Isso significa que, nesses meses, a evapotranspiração real da bacia nas condições naturais, antes do reservatório, excede à evaporação do lago.

Os valores extremos de evaporação líquida total anual calculados pelo ONS foram de 90 mm em Tucuruí e 600 mm em Serra da Mesa, conforme Tabelas 4.3.10 a 4.3.12 a seguir. Por essas tabelas pode-se confirmar que a criação de reservatórios sempre aumenta a evaporação local anual e, conseqüentemente, a umidade relativa do ar.

Na Figura 4.3.14 já mencionada tem-se a Evaporação Líquida Mensal do Reservatório de Lajeado, calculada pelo ONS (2001) e apresentada na Tabela 4.3.10, indicada sobre o Balanço Hídrico da Estação Porto Nacional. Observa-se que os meses de julho e agosto são os que apresentam as maiores evaporações líquidas, como consequência da evapotranspiração real, que é mínima nesses meses.

Tabela 4.3.10 – Evaporação Líquida para Usinas em Operação Segundo a Normal Climatológica 61-90

NOME	Evp1	Evp2	Evp3	Evp4	Evp5	Evp6	Evp7	Evp8	Evp9	Evp10	Evp11	Evp12	Total
ÁGUA VERMELHA	1	16	30	51	74	75	68	65	63	21	5	26	495
AIMORÉS	-4	5	37	43	54	50	42	35	26	13	1	5	307
ÁLVARO SOUZA LIMA	17	19	16	18	23	24	32	33	29	25	31	24	294
APOLÔNIO SALES	38	35	37	51	61	64	48	22	17	9	17	40	440
ARMANDO S. OLIVEIRA	20	10	2	49	62	5	47	43	43	23	5	26	335
BARRA BONITA	20	13	38	64	73	65	50	42	43	19	-1	26	452
BOA ESPERANÇA	38	21	14	13	17	29	43	49	58	55	50	62	449
CACHOEIRA DOURADA	19	8	27	47	66	71	70	72	77	34	17	35	543
CACONDE	17	11	37	51	62	62	55	57	48	16	19	31	466
CAMARGOS	0	4	30	40	52	48	34	24	23	15	5	8	283
CANA BRAVA	31	9	17	26	47	61	68	78	94	59	45	36	571
CANOAS I	19	24	42	58	73	62	46	42	42	7	2	22	439
CANOAS II	22	24	42	59	73	63	47	42	44	7	3	22	448
CAPIVARA	11	22	39	56	79	71	54	46	43	-1	-6	10	424
CHAMINE	19	24	33	35	35	26	19	20	9	4	11	29	264
CHAVANTES	28	20	45	69	82	71	57	44	44	13	-6	19	486
COMPLEXO SEGREDO	10	32	61	83	86	69	54	41	22	-12	-7	0	439
CORUMBÁ I	5	-2	16	36	55	61	63	61	65	28	10	23	421
CURUÁ-UNA	23	19	15	4	-1	-11	-18	-22	-11	16	36	49	100
D. FRANCISCA	22	35	62	74	74	53	36	18	-9	-30	-29	-12	294
DERIV. JORDÃO EIXO B	13	33	62	83	83	66	51	39	21	-11	-5	4	439
DESVIO JORDÃO	13	33	62	83	83	66	51	39	21	-11	-5	4	439
EMBORCAÇÃO	3	1	14	35	52	55	56	52	51	19	4	16	358
ERNESTINA	34	41	60	64	62	38	26	24	16	-4	9	-7	363
ESTREITO	12	6	18	38	55	53	51	46	45	20	3	19	366
EUCLIDES DA CUNHA	17	8	23	40	53	47	39	35	32	11	2	22	329
FOZ DO AREIA	25	20	20	20	18	18	21	24	24	27	29	31	278
FUNIL	-12	-10	22	47	55	49	33	20	20	4	-9	-4	215
FURNAS	12	1	29	4	55	54	45	44	37	16	9	31	337
GAFANHOTO	5	4	31	32	37	37	30	40	39	32	18	19	324
GUARICANA	19	26	40	48	51	38	24	18	4	-8	-3	24	281
GUILMAN	-5	-5	32	51	59	53	41	26	24	29	19	12	336
HENRY BORDEN	11	12	33	42	45	38	25	21	15	3	-2	18	261

Tabela 4.3.10 – Evaporação Líquida para Usinas em Operação Segundo a Normal Climatológica 61-90 – continuação

NOME	Evp1	Evp2	Evp3	Evp4	Evp5	Evp6	Evp7	Evp8	Evp9	Evp10	Evp11	Evp12	Total
IBITINGA	19	14	38	62	74	68	54	48	49	19	1	25	471
IGARAPAVA	11	4	26	51	65	68	61	59	61	35	13	31	485
ILHA DOS POMBOS	18	21	33	32	31	30	30	32	32	23	18	15	315
ILHA SOLTEIRA	15	24	37	56	79	75	65	62	58	16	4	24	515
ILHA SOLTEIRA EQUIV.	15	24	37	56	79	75	65	62	58	16	4	24	515
IRAPÉ	16	11	36	58	84	87	80	60	47	46	37	29	591
ITÁ	3	25	56	74	85	69	51	35	16	-20	-23	-34	337
ITAIPI	11	29	49	59	64	54	35	28	15	-20	-30	-15	279
ITAPARICA	39	30	25	24	32	39	44	48	50	47	46	44	466
ITAPEBI	-12	-9	18	50	61	56	36	10	1	-5	-8	-12	186
ITAÚBA	10	35	67	83	83	64	46	29	0	-26	-32	-20	339
ITIQUIRA	11	8	12	16	25	25	41	50	46	31	23	14	302
ITUMBIARA	15	5	21	46	65	74	73	71	72	33	13	31	519
ITUTINGA	4	12	33	42	50	46	31	25	27	21	9	6	306
JACUÍ	35	48	67	70	62	43	26	18	7	-9	-2	4	369
JAGUARA	12	5	23	47	63	63	56	53	53	30	9	28	442
JAGUARI	11	5	23	42	53	47	35	27	27	12	-1	13	294
JAURU	6	3	13	10	12	12	28	30	32	20	10	7	183
JUPIÁ	15	17	15	18	23	22	32	37	36	29	29	21	296
JURUMIRIM	20	20	18	20	23	23	29	30	28	26	33	28	297
LAJEADO	5	5	2	4	18	24	40	42	31	20	11	6	208
MACHADINHO	10	30	63	80	89	67	50	38	18	-17	-15	-31	382
MANSO	26	7	17	21	39	59	53	71	28	36	45	61	463
MARIMBONDO	18	12	32	58	74	74	65	61	62	28	8	32	524
MÁRIO LOPES LEÃO	18	17	37	59	77	72	60	54	53	18	2	24	491
MASC. DE MORAES	11	2	18	35	48	45	40	37	38	15	4	22	315
MASCARENHAS	-23	-13	30	52	76	70	50	28	19	5	-10	-10	274
MIRANDA	4	6	17	37	54	53	53	52	44	17	5	23	365
NOVA AVANHANDAVA	17	21	37	57	77	72	61	56	54	17	2	24	495
NOVA PONTE	18	8	27	42	64	68	70	70	59	27	18	38	509
PARAITIGA/PARAIBUNA	3	5	27	42	50	47	29	17	11	1	-10	3	225
PARIGOT DE SOUZA	16	14	15	17	22	22	26	26	14	13	17	16	219
PASSO FUNDO	28	42	66	78	75	52	37	30	16	-10	-1	3	416
PASSO REAL	18	40	69	80	78	57	38	23	6	-19	-19	-23	348
PAULO AFONSO I	38	35	37	51	61	64	48	22	17	9	17	40	440
PEREIRA PASSOS	-33	-29	1	35	67	81	78	56	36	8	-13	-18	269
PIRAJU	26	24	42	64	72	63	47	42	39	19	4	39	481
PORTO COLÔMBIA	15	9	30	57	72	73	63	61	60	32	9	33	514
PORTO PRIMAVERA	12	22	35	47	68	59	42	40	39	-9	-10	11	356
PORTO ESTRELA	14	17	20	22	28	33	37	41	33	24	17	12	298
QUEIMADO	20	4	21	34	5	7	79	80	80	5	23	49	407
RESERV. BILLINGS	11	12	33	42	45	38	25	21	15	3	-2	18	261
ROSAL	-21	-16	22	45	50	42	24	8	-5	9	0	-5	153
ROSANA	10	21	36	48	68	59	44	40	38	-9	-11	10	354
SÁ CARVALHO	0	11	35	32	49	43	35	32	32	19	7	12	306

Tabela 4.3.10 – Evaporação Líquida para Usinas em Operação Segundo a Normal Climatológica 61-90 – continuação

NOME	Evp1	Evp2	Evp3	Evp4	Evp5	Evp6	Evp7	Evp8	Evp9	Evp10	Evp11	Evp12	Total
SALTO CAXIAS	3	22	44	61	77	68	47	32	19	-22	-23	-17	312
SALTO GRANDE	19	24	31	27	29	29	34	42	42	33	21	18	349
SALTO OSÓRIO	14	28	49	64	83	67	48	37	26	-17	-10	-1	388
SALTO SANTIAGO	24	39	66	81	86	66	52	44	36	-8	10	0	496
SANTA BRANCA	8	7	27	45	55	48	32	22	18	5	-7	9	269
SANTA CECÍLIA	0	1	30	23	22	16	14	16	17	6	7	11	163
SANTA CLARA	9	12	15	18	22	25	28	32	27	19	13	24	294
SÃO SIMÃO	18	13	25	46	70	76	72	71	71	23	9	27	521
SEGREDO	10	32	61	83	86	69	54	41	22	-12	-7	0	439
SERRA DA MESA	27	7	14	25	50	68	81	91	103	57	42	35	600
SOBRADINHO	41	29	23	36	48	58	56	47	51	46	47	56	538
SOBRAGI	-13	-10	25	46	49	43	27	13	17	12	2	-3	208
TAQUARUCU	11	22	38	52	74	64	47	44	41	-4	-7	12	394
TRÊS IRMÃOS	16	24	39	58	79	74	63	60	57	16	4	25	515
TRÊS MARIAS	3	0	27	47	63	64	60	54	55	42	24	24	463
TUCURUÍ	22	19	14	2	-9	-15	-14	-12	9	16	31	27	90
VOLTA GRANDE	12	7	29	57	70	72	63	61	59	34	9	34	507
XINGÓ	32	26	22	22	30	36	38	40	39	37	34	34	388

Fonte: ONS, 2001

Tabela 4.3.11 – Evaporação Líquida para Usinas que Entrarão em Operação até 2005, segundo a Normal Climatológica 61-90

NOME	Evp1	Evp2	Evp3	Evp4	Evp5	Evp6	Evp7	Evp8	Evp9	Evp10	Evp11	Evp12	Total
BARRA BRAÚNA	18	20	23	22	27	30	33	35	28	21	19	16	292
CANDONGA	-13	-4	33	50	61	54	49	27	23	17	8	0	305
CUBATÃO-SUL	5	11	33	39	43	33	23	14	2	-12	-15	0	176
ESPORA	14	15	14	19	26	28	42	48	45	32	27	18	328
FUNIL-GRANDE	13	5	35	46	55	54	45	44	41	20	12	29	399
ITAOCARA	-14	-2	38	59	74	65	47	28	21	8	-8	-6	310
ITUMIRIM	13	15	15	19	28	28	43	51	47	34	28	18	339
MURTA	-4	8	47	73	76	71	55	34	45	31	20	13	469
OURINHOS	19	20	18	19	21	22	28	29	29	27	34	27	291
PICADA	-11	-6	23	36	42	40	17	8	16	17	-2	-2	178
QUEBRA-QUEIXO	17	36	67	85	87	65	50	41	22	-13	-5	-6	446

Fonte: ONS, 2001

Tabela 4.3.12 – Evaporação Líquida para Usinas em Processo de Licitação, segundo a Normal Climatológica 61-90

NOME	Evp1	Evp2	Evp3	Evp4	Evp5	Evp6	Evp7	Evp8	Evp9	Evp10	Evp11	Evp12	Total
CACHOEIRINHA	24	19	19	18	17	17	20	22	23	26	30	31	267
COUTO MAGALHÃES	15	0	16	30	52	62	68	75	73	27	16	24	458
MONJOLINHO	6	29	57	73	79	65	46	28	12	-20	-24	-27	324
P. CAVALO	19	16	15	14	18	24	26	29	29	23	20	20	253
PAI-QUERÊ	-6	12	39	56	63	53	38	21	0	-28	-36	-27	185
SACOS	12	13	16	22	33	42	55	62	57	39	24	19	394
SALTO PILÃO	17	15	18	21	21	20	19	19	17	20	23	23	230
SANTA ISABEL	5	5	6	7	8	17	27	28	23	17	14	7	164
SIMPLICIO	-8	12	37	54	63	57	46	23	18	15	0	-21	296
SÃO JOÃO	25	20	19	19	16	17	21	23	24	26	30	31	269
SÃO SALVADOR	4	4	8	11	26	31	46	51	42	25	15	9	273
TRAÍRA II	13	17	20	22	30	35	40	45	34	26	18	11	312

Fonte: ONS, 2001

4.3.2 – Recursos Hídricos

A Tabela 4.3.13 apresenta o Quadro de Avaliação de Impactos sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, decorrentes da construção de barragens e enchimento de reservatórios. Nos sub-itens seguintes são descritos os impactos correspondentes a este fator ambiental.

4.3.2.1 – Intensificação de Ondulações no Espelho d'Água

O vento, atuando sobre uma superfície d'água, transfere energia para a massa líquida, promovendo a formação de ondas de translação e, para corpos d'água mais extensos, de marés de vento, com o deslocamento da massa líquida no sentido das predominâncias.

A intensidade desses efeitos junto às bordas de um corpo d'água está associada à profundidade, à extensão do eixo de atuação do vento sobre a superfície, o denominado “fetch”, e à velocidade e permanência do vento.

Estas variáveis serão alteradas com a formação do reservatório e pode-se esperar uma alteração na magnitude das ondas junto às margens do corpo d'água e das ondulações no interior do reservatório, principalmente se as direções predominantes dos ventos da região coincidirem com a direção longitudinal do corpo do reservatório.

Este impacto é significativo mas de pequena magnitude, a relevância pode ser considerada média porque aumenta o poder erosivo das águas sobre as barrancas marginais, eleva o poder de embate e de escalamento das águas nas estruturas edificadas em suas bordas e introduz maiores riscos e dificuldades à navegação.

Tabela 4.3.13 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Recursos Hídricos

SUB FATOR	AÇÃO ⁽¹⁾	IMPACTOS	ATRIBUTOS					MAGNITUDE			GRAU DE RELEVÂNCIA	INSERÇÃO TERRITORIAL	MEDIDAS MITIGADORAS
			POSIT. NEGAT.	PROB. DE OCOR.	ALCANCE ESPAC.	DURAÇÃO	REVERS.	QUANTIFICAÇÃO		QUALIFICAÇÃO			
								ABSOLUTA	RELATIVA (%)				
REGIME DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL	5, 7 e 9	INTENSIFICAÇÃO DE ONDULAÇÃO NO ESPELHO D'ÁGUA	N	B	D	P	I			P	M	RESERVATÓRIO	MONITORAMENTO
		VARIAÇÃO DIÁRIA DO NÍVEL D'ÁGUA DO RIO A JUSANTE	N	A	L	P	R			P	B	RIO TOCANTINS	MONITORAMENTO
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	4,5,6,7 e 9	INTENSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE ASSOREAMENTO A MONTANTE	N	A	D	P	I			P	M	RESERVATÓRIO	MONITORAMENTO
NÍVEL FREÁTICO E DE AQUÍFEROS CONFINADOS	5,7 e 9	ACRÉSCIMO DE PRODUTIVIDADE DOS AQUÍFEROS	P	C	L	P	I			M	M	AI	MONITORAMENTO DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL
		FORMAÇÃO DE ÁREAS ÚMIDAS E ALAGADAS	N	A	D	P	I			M	M	BORDA DO LAGO	
		ACRÉSCIMO DA SUSCEPTIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS	N	A	L	P	I			P	M/B	BORDA DO LAGO	FREÁTICO E DOS AQUÍFEROS CONFINADOS
	9	VARIAÇÕES DO NÍVEL DURANTE A OPERAÇÃO	N	C	L	T	R			M	M/A	BORDA DO LAGO	

(1) - Ações: 1 - Aquisição de Áreas; 2 - Adequação de acessos e instalação de Canteiro e Acampamento; 3 - Operação do canteiro e do acampamento; 4 - Abertura e exploração de jazidas e área de empréstimo e limpeza de terrenos para implantação das obras; 5 - Desvio do rio; 6 - Construção da Barragem, do vertedouro e da Tomada d'Água e Casa de Força; 7 - Enchimento do reservatório; 8 - Conclusão das obras; 9 - Operação da barragem e da usina.

OBS.: Impacto : N - Negativo, P - Positivo;
 Probabilidade de Ocorrência : C - Certa, A - Alta, B - Baixa;
 Alcance Espacial : D - Disperso, L - Localizado;
 Duração : P - Permanente; T - Temporária;
 Reversidade : R - Reversível, I - Irreversível;
 Magnitude : P - Pequena, M - Média, G - Grande;
 Grau de Relevância : A - Alto, M - Médio, B - Baixo

Fonte: THEMAG, 1996

4.3.2.2 – Variação Diária do Nível d'Água do Rio a Jusante da Barragem

Barragens de reservação são construídas para alterar a distribuição natural do escoamento, buscando a época oportuna para a liberação das águas. Elas comprometem o aspecto dinâmico dos rios, que é fundamental para a manutenção do ecossistema aquático.

Os rios naturais, seus habitats e espécies, são função do escoamento, quantidade e características dos sedimentos em movimento e composição dos materiais que conformam o leito e as margens. A descarga característica do rio inclui ambos elementos, de escoamento alto e baixo. Essa dinâmica, e não as condições médias controladas pelas operações das barragens, determinam as principais características físicas do curso d'água, que, por sua vez, asseguram a integridade do ecossistema (WCD, 2000). Na Figura 4.3.15 a seguir tem-se os hidrogramas do rio Colorado em duas condições: antes e após a construção da barragem em Lee's Ferry, nos Estados Unidos. Observa-se a redução dos picos dos hidrogramas de cheia, em setembro.

A extensão dos impactos também dependerá se a água é extraída ou derivada para consumo ou deixada no escoamento. O estabelecimento de uma nova dinâmica tem efeitos positivos sobre algumas espécies e negativos em outras.

O regime de escoamento natural, as enchentes, sua duração e frequência são críticas para a sobrevivência de comunidades de plantas e animais que vivem a jusante. Pequenas enchentes podem agir como deflagradores biológicos da migração de peixes e invertebrados, enquanto que as enchentes maiores criam e mantêm os habitats por remoção ou transporte dos sedimentos.

Figura 4.3.15 – Modificação no Regime de Escoamento Anual devido à Barragem de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry, Estados Unidos.

Fonte: WCD, 2000

A operação da usina para cobrir variações de carga elétrica também implica em variações do nível d'água de jusante ao longo do dia, conforme apresentado na Figura 4.3.16 a seguir.

Figura 4.3.16 – Flutuação Diária da Vazão Efluente devido à Operação de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry, Estados Unidos

Fonte: WCD, 2000

Quanto mais afastado da barragem, menor o efeito da variação diária das efluências, pelo fenômeno de amortecimento hidráulico.

Estas variações, em particular a subida diurna, significarão algumas condicionantes às instalações e aos modos de uso das praias eventualmente existentes a jusante. A real consequência deste impacto é impossível de se prever, dado que dependerá, em cada estação, da vazão do rio, que será influenciada pelas chuvas, pela operação do reservatórios de montante e, também, da conformação dos depósitos de areia.

Pode-se avaliar como impacto negativo, de alta probabilidade de ocorrência, localizado, permanente porém reversível, de pequena magnitude e baixa relevância.

4.3.2.3 – Intensificação dos Processos de Assoreamento a Montante

a) Generalidades

Os processos responsáveis pela sedimentação ou assoreamento de reservatórios são muito complexos, abrangendo erosão, deslocamento das partículas por enxurradas ou outros meios até os rios, transporte do sedimento nos cursos d'água, deposição do sedimento na calha dos rios, lagos e reservatórios e sua compactação.

Os principais agentes externos do processo de sedimentação são a água, o vento, a gravidade, o gelo e as atividades antrópicas. O aumento da população e, conseqüentemente, das áreas agrícolas, das cidades, do aproveitamento dos cursos d'água, acarretou o aumento da erosão nas terras, do transporte sólido nos rios e dos depósitos de sedimentos nos canais fluviais e reservatórios, portos fluviais e marítimos e na foz dos cursos d'água.

Regiões situadas em clima tropical são especialmente suscetíveis à erosões, devido às elevadas temperaturas e chuvas abundantes, que aceleram o processo geológico de decomposição da rocha matriz, dando origem a espessos pacotes de solos superficiais de origem coluvionar, residual ou ambos.

A quantidade de sedimentos erodidos de uma bacia hidrográfica é denominada de erosão bruta ou total e inclui sedimentos e sólidos dissolvidos. A erosão efetiva refere-se apenas à quantidade de sedimentos retirados da bacia. À deposição dos solos em depressões, áreas baixas ou com vegetação denomina-se colúvio. O

material depositado nas planícies de inundação é denominado aluvião e o depositado no próprio curso d'água é denominado banco de areia ou barra. A quantidade de sedimentos que completa o percurso e alcança o posto de medição ou um reservatório é conhecida como contribuição ou produção de sedimento ou rendimento sólido. A jusante do posto essa produção é denominada transferência ou remoção de sedimentos.

Dentre os exemplos clássicos de erosão pela formação de um rio tem-se o Grande Cânion, no rio Colorado, nos EUA, com escavações de 1.000 a 2.000 m de profundidade (CARVALHO, 1994). No Brasil tem-se o cânion do rio Iguaçu, nas Cataratas do Iguaçu, e o rio Amazonas, cujas águas erodem seu leito e margens, formando depósitos e novos braços, que moldam continuamente seu leito e seu curso d'água ao longo dos anos.

Por outro lado, os depósitos aluviais criam grandes assoreamentos, como no caso dos deltas, cujas terras são geralmente férteis e os canais são piscosos, por causa da grande quantidade de nutrientes transportada com os sedimentos. O delta mais conhecido é o do rio Nilo, no Egito, além do delta do Mississipi, nos EUA, do Ganges, do Golfo de Bengala e do Orinoco, na Venezuela. No Brasil tem-se o delta do Parnaíba, entre o Piauí e o Maranhão, o do rio São Francisco, entre Alagoas e Sergipe, e os deltas estuarinos do Amazonas e do rio Doce.

Como forma de depósito interior tem-se o Pantanal Matogrossense, com cerca de 180.000 km², cuja formação sobre uma depressão, atribuída ao lendário mar dos Xaraés, se deu pelo transporte e depósito de sedimentos ao longo de milhares de anos.

Nos itens seguintes são apresentados, com maior detalhe, os diversos estágios do processo de sedimentação, com vistas ao entendimento de suas implicações com obras de barramento de rios.

b) Erosão

“Erosão é o fenômeno do desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arrastamento das partículas, por ação da água ou outros agentes, como o vento” (CARVALHO, 1994).

A erosão é um fenômeno muito bem estudado em agricultura, devido à sua importância para a conservação dos solos e a produção de alimentos. Segundo a ONU – Organização das Nações Unidas - a erosão pela intervenção humana provocou a perda de mais de 1,2 bilhões de hectares de cultivo nos últimos 50 anos (CARVALHO, 1994). Esta área corresponde à soma dos territórios da China e da Índia. Cerca de 9 milhões de hectares deste total foi tão danificada que perdeu quase toda a função biológica, transformando-se em desertos (CARVALHO, 1994).

Além da aplicação na agricultura, onde são necessários conhecimentos sobre o valor das perdas de solo e demais parâmetros, para projetos de conservação e manejo, os estudos de erosão se aplicam a diversos campos, dentre eles à bacia hidrográfica como um todo, para a concepção de providências de proteção.

Para efeito de comparação entre bacias hidrográficas, pode-se analisar a produção específica de sedimentos, que é a relação entre o deflúvio sólido anual, em t/ano, e a área de drenagem da bacia contribuinte, em km². A produção de sedimentos representa o rendimento sólido da área de drenagem considerada e traduz a produção específica em suspensão, devendo ser extrapolada para a produção total de sedimentos, de modo a incluir a carga em suspensão não medida e a carga do leito. Estas parcelas equivalem a cerca de 15% da descarga medida (MAHMOOD, 1987 apud CARVALHO, 1994).

O total mundial de produção de sedimentos em suspensão é de 165 t/km².ano, com base em dados anteriores a 1987 (MAHMOOD, 1987 apud CARVALHO, 1994). Considerando 15% de acréscimo para incluir as parcelas acima referidas, ter-se-ia 190 t/km².ano. Isso significa uma concentração média de 490 ppm (490 mg/l) até 1987, e de 500 ppm naquele ano (MAHMOOD, 1987 apud

CARVALHO, 1994). Os maiores valores mundiais de produção de sedimentos em suspensão registrados até 1985, segundo relatório do Banco Mundial, constam da Tabela 4.3.14 a seguir. Nessa tabela, a maior parte dos rios apresenta produção de sedimentos superior à média anual mundial, de 165 t/km².ano.

Tabela 4.3.14 – Produção de Sedimentos em Suspensão dos Maiores Rios do Mundo

CURSOS D'ÁGUA	ÁREA DA BACIA (x 10 ⁶ km ²)	P _{ss} (t/km ² x ano)	CONC. MÉDIA (mg/l ou ppm)
Ganges/Bramaputra	1,48	1.670	1.700
Amarelo (Huangho)	0,77	1.080	22.000
Amazonas	6,15	900	140
Yang Tsé	1,94	478	530
Irawaddy	0,43	285	670
Magdalena	0,24	220	930
Mississipi	3,27	210	360
Orinoco	0,99	210	190
Vermelho (Hungho)	0,12	160	1.300
Me Kong	0,79	160	340
Indus	0,97	100	420
Mackenzie	1,81	100	330

PSS = Produção de Sedimentos em Suspensão

Fonte: UNESCO, 1985 apud CARVALHO, 1994

A avaliação das perdas de solo por erosão podem ser feitas de diversas maneiras, seja por equações, modelos paramétricos, modelos de estimativa direta da degradação específica de bacias, etc. Dentre os modelos paramétricos para avaliação da erosão, o mais empregado para o cálculo, em termos médios anuais, é o da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE – “Universal Soil Loss Equation”), desenvolvida por Wischmeier e Smith e melhorada por outros pesquisadores. A USLE associa a erosividade das chuvas e a erodibilidade dos solos da região à energia do relevo e à cobertura vegetal da bacia e permite o cálculo indireto da erosão dos solos através da seguinte fórmula:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4.8)$$

onde:

A = perda de solo por unidade de área e tempo, em t/ha.ano, ou outra unidade, dependendo das que forem usadas nos diversos parâmetros;

R = fator de erosividade da chuva, que expressa a erosão potencial ou poder erosivo da precipitação média anual da região, em t.m/ha.mm/hora;

K = fator de erodibilidade do solo, que representa a capacidade do solo de sofrer erosão por uma determinada chuva, em t/ha/(t.m/ha.mm/hora);

L = fator topográfico que expressa o comprimento do declive;

S = fator topográfico que expressa a declividade do terreno ou grau do declive;

C = fator que expressa uso e manejo do solo e cultura;

P = fator que expressa a prática conservacionista do solo.

A USLE, de aplicação restrita à áreas de uso agrícola, resulta em valores muito altos da perda de solo, não podendo ser utilizados diretamente no estudo do transporte de sedimento pelo rio. Isso se deve do fato de que a USLE calcula o total erodido, mas apenas uma parte desse total alcança o rio e, conseqüentemente, o reservatório. Os valores de produção de sedimentos aceitáveis são de menos de 35 t/km² x ano, para tolerância baixa, de 70 a 175 para tolerância moderada e de mais de 175 t/km² x ano para tolerância alta (CARVALHO, 2000).

Para se conhecer a produção de sedimentos no local onde se pretende implantar uma barragem é necessário coletar os dados hidrológicos e sedimentológicos disponíveis no próprio curso d'água. Na falta destes deverão ser instalados postos para obter esses dados, conforme CARVALHO (2000). Pode-se também utilizar a regionalização de dados, para as fases iniciais dos estudos. A regionalização pode ser feita a partir de dados de dois postos existentes no curso d'água em questão. Com a produção específica média em cada posto e a área de drenagem correspondente, traça-se uma reta. Com a área de drenagem no local de interesse, ainda sem medições, obtém-se uma estimativa para a produção específica de sedimentos a partir da reta traçada. Na Figura 4.3.17 a seguir tem-se um exemplo de regionalização para o rio São Francisco e rio das Velhas.

Figura 4.3.17 – Bacia do Rio São Francisco – Linhas de Produção de Sedimentos

Fonte: CARVALHO, 1994

Da mesma forma pode-se fazer regionalização com dados de bacias vizinhas e com dados de várias bacias locais, mas não se recomenda essa metodologia para as etapas de estudos que exijam maior precisão, incluindo a etapa de Estudos de Viabilidade.

c) Produção de Sedimentos nas Bacias Hidrográficas Brasileiras

A ELETROBRÁS, preocupada com o assoreamento de reservatórios de hidrelétricas, encomendou ao IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, um estudo sobre a produção de sedimentos nos rios brasileiros (ELETROBRÁS, 1992).

O estudo avaliou áreas que apresentam características homogêneas de erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, relevo e cobertura vegetal, e concluiu que, nessas áreas, tanto as CMA (concentrações médias anuais em suspensão) quanto as descargas sólidas específicas também apresentam valores semelhantes, podendo-se distinguir 19 zonas homogêneas no território brasileiro.

As diferenças entre as descargas específicas médias são explicadas pelas diferenças nas chuvas, nos solos, na cobertura vegetal e às vezes, no relevo.

Na Figura 4.3.8 e na Tabela 4.3.15 a seguir constam as principais características das zonas hidrossedimentológicas homogêneas brasileiras. Quanto ao parâmetro “R” – índice de erosividade das chuvas da USLE – verifica-se que é superior a 1.000 em toda a região Norte, correspondendo à erosividade muito forte, especialmente na parte oeste da Amazônia Central e Rio Negro (N3a e N3b), onde as precipitações superam os 2.500 mm/ano. Na região Sul esse índice varia entre 500 e 1.000, correspondendo à erosividade forte ($750 < R < 1.000$) e erosividade moderada a forte ($500 < R < 750$). Na região Leste, por fim, a erosividade varia entre 250 e 1.000, sendo que a faixa inferior ($250 < R < 500$), correspondente à erosividade moderada, ocorre na zona baiana.

O fator erodibilidade do solo “K” também se refere à fórmula da USLE e apresenta três faixas: de erodibilidade fraca ($K < 0,15$), média ($0,15 < K < 0,30$) e elevada ($K > 0,30$). As demais características da superfície constantes da Tabela 4.2.4 referem-se à topografia dos terrenos e à sua cobertura vegetal.

A concentração média anual em suspensão (CMA) e a produção específica média de sedimentos foram os valores calculados com base nos dados disponíveis, que permitiram classificar as zonas homogêneas. A média global extrapolada para bacias de 15.000 km² é a média dos valores obtidos para cada posto, com base na formulação de Khosla (PNUD, 1977 apud ELETROBRÁS, 1992), deduzida a partir de medições realizadas em cerca de 200 bacias hidrográficas norte-americanas.

Observa-se que, tanto na CMA quanto na produção específica média de sedimentos, seja das bacias, seja a média global extrapolada para bacias de 15.000 km², os máximos valores ocorreram nas regiões do Acre (Na5) e Mineira (E6), registrando-se um valor extremo de 455 t/ km² x ano de produção específica média em Rondônia (N5b). Por outro lado, na Planície do Amazonas e no Pantanal, ocorre depósito de sedimentos ao invés de produção.

Figura 4.3.18 – Zoneamento Hidrossedimentológico Prévio do Brasil

Fonte: ELETROBRÁS, 1992

Tabela 4.3.15 – Regionalização Hidrossedimentológica Prévia do Brasil

Região	Zona	Código	Precipitações		Características da Superfície Predominante			CMA Concent. Média Anual da Suspensão (mg/l)	Produção Específica (t/km ² ano)	
			Índice Erosividade R(USLE)	Média Anual (mm)	Erodibilidade do Solo	Relevo Atitude (m)	Cobertura Vegetal		Média das bacias	Média Global Extrapolada para Bacia de 15000 km ²
Espinha Dorsal		00	± 1000	1250/2000	Média	200/800	Cerrado	260	146	145
NORTE	Planície do Amazonas	N1	X	X	X	X	X	220	Depósitos	X
	Roraima Amazonia Setentrional	N2a	>1000	1500/2000	Média	100/500	Floresta/ cerrado	65	50	50
		N2b			Média/fraca			15	4,5	7,5
	Amazonia Central Rio Negro	N3a	>1000	>2000 e >2500 na parte oeste	Fraca Média/fraca (risco de voçorocas)	<100	Florestal	15	2,5	2
		N3b						15		23
	Amazonia Ocidental	N4	>1000	>2000		<200	Floresta	150	100	160
	Acre Rondônia	N5a	>1000	>2000	Alta/média	100/500	Floresta	500	250	350
N5b		Média			100/800	Floresta/ cerrado	170	455	245	
Tapajós	N6	>1000	2000/2500	Fraca	200/500	Cerrado	20	8	10	
Amazonia Oriental	N7	>1000	1500/2000	Média/fraca	200/500	Cerrado	65	65	50	
Litoral Amazônico	N8	>1000	>2000	Fraca	<100	Florestal	27	16	17	
LESTE	Maranhense	E1	1000	1000/2500	Média	200/500	Campos	-	-	-
	Pré-Amazonica	E2	500/1000	1000/1250	Fraca	200/800	Caatinga	82	10	14
		E2a	750/1000	1000/1500	Média	200/500		-	-	-
	Nordeste	E3	250/750	Variável max. 650	Variável (de me'dia a forte/alta)	Variável	Caatinga	200 (110/500)	30	82
	Baiana	E4	500	500	Média	500/800	Caatinga/cerrado	-	-	-
		E4a	250/500	500/1000	Alta	0/800	Caatinga	-	-	-
SUL	Litoral Leste	E5	500/750	650/2000	Fraca/média	Inclinado 0/800	Mata/lavoura	220	43	66
	Mineira	E6	500/1000	Variável 1000/2000	Alta/média	Íngreme 500/1200	Cerrado	315	250	250
	Litoral Sul	S1	750/1000	1250/2000	Alta/média	Íngreme	Mata	100	155	55
	Paulista	S2	750	-	-	Plano	-	165	45	-
	Pantanal	S3	750/1000	1000/1250	Média/fraca	Plano	Campos	180	Depósitos	-
	Sudeste	S4	750/1000	1250/2000	Alta/média	Planalto recortado	Lavouras	100	95	50
	Sul	S5	500/750	1000/2000	Alta p/ leste média p/ oeste	Ondulado íngreme	Campos/ mata	50	26	20

Fonte: ELETROBRÁS, 1992

Os valores de produção específica e demais características indicadas correspondem às médias globais, destinadas sobretudo a efetuar comparações, e são sujeitos a grandes variações locais e temporais. Além disso, os valores das produções específicas são inferiores aos reais, conforme conclusão do estudo, devido às

limitações dos cálculos e da base de dados utilizada, incompleta e com poucos anos de observação.

O grau de predisposição das diversas zonas hidrossedimentológicas homogêneas aos riscos de erosão e sedimentação, calculado em 1988 (ELETROBRÁS, 1992), constam da Tabela 4.3.16 a seguir e foram obtidos ponderando-se os valores da última coluna da Tabela 4.3.15 pelos balanços sedimentológicos rudimentares e pelo valor das CMA.

Tabela 4.3.16 – Classificação das Zonas Hidrossedimentológicas pela sua Predisposição Presente (1988) aos Riscos Sedimentológicos

CLASSE	DEGRADAÇÃO ESPECÍFICA Pss (*) (t/km ² x ano)	CÓDIGO DA ZONA(**)
I	Pss > 300	N5a, N5b
II	300 > Pss > 150	E6, E4a (provável)
III	150 > Pss > 100	00, N4
IV	100 > Pss > 75	S1, S4
V	75 > Pss > 50	N2a, N7, E3, E5
VI	50 > Pss > 25	S2, S5, N3b
VII	25 > Pss > 5	N2b, N6, N8, E2
VIII	5 > Pss > 0	N3a
IX	Depósitos	N1, S3
X	Sem dados	E1, E2a, E4, E4a

(*) Produção específica em suspensão para bacias de 2.500 a 30.000 km² (exceto para a Zona N4, com superfície de referência de 100.000 km²)

(**) Ver Figura 4.3.18

Fonte: ELETROBRÁS, 1992

Confirma-se, nessa tabela, que o Acre e Rondônia são as regiões brasileiras com maior suscetibilidade aos processos erosivos.

d) Transporte de Sedimentos

O transporte de sedimentos é uma das fases do processo de sedimentação e se processa nos cursos d'água, sendo que a maior quantidade de transporte (70% a 90%) ocorre na época chuvosa (CARVALHO, 1994). Considerando que a

ocorrência de maior ou menor erosão é função de muitos fatores, com forte influência das chuvas, as medições de sedimentos transportados pelo rio devem ser programadas para épocas convenientes.

As formas de transporte dos sedimentos no curso d'água são variáveis em função de sua granulometria, das condições do leito e das características do escoamento. As forças que atuam sobre a partícula podem mantê-la em suspensão ou no fundo do rio, saltando do leito para o escoamento, deslizando ou rolando ao longo do leito. Intervém neste processo: o tamanho da partícula, seu peso e forma, o tipo do escoamento, se laminar ou turbulento, a velocidade da corrente, os obstáculos no leito do rio, sua declividade, forma do canal, temperatura da água, etc.

A definição corrente mais aplicada resume em três as formas de transporte:

- por arrasto: que é o transporte de partículas que se encontram em contacto com o leito do rio, por rolagem ou escorregamento longitudinal;
- saltante: que é o transporte de partículas do fundo para a correnteza, devido à impactos de outras partículas ou ao fluxo d'água;
- em suspensão: é o transporte de partículas suficientemente pequenas para permanecerem em suspensão, suportadas pelas componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estão sendo transportadas pelas componentes horizontais destas velocidades.

Quanto à evolução no tempo relativamente à evolução das enchentes, que são os fatores de maior peso na desagregação dos solos e seu transporte, observa-se, para o transporte de sedimentos, a formação de uma onda similar à hidrógrafa das cheias. O pico da concentração de sedimentos na água pode coincidir com o pico da hidrógrafa, antecipar-se ou atrasar-se com relação à ele, sendo mais comum a antecipação do pico dos sedimentos.

A distribuição de sedimentos num curso d'água varia ao longo de uma seção vertical, numa seção transversal, ao longo do curso d'água e no tempo. A natureza procura um equilíbrio próprio, considerado estável para o rio. Se há

mudança na quantidade de descarga sólida, o rio reage conforme as alterações impostas. Assim, se aumenta a carga sólida, haverá uma tendência de depósitos, ocorrendo a “agração” (assoreamento) do leito do rio. Ao contrário, se a carga sólida diminui, o rio responde com a “degradação” (erosão) do leito. O equilíbrio dinâmico de um rio em condições naturais é atingido ao final de um período de muitos anos e apresenta variações sazonais com a hidrologia, alternando o assoreamento do leito, nas estiagens, com sua erosão, nas épocas chuvosas.

Quando acontece uma mudança nas condições naturais do curso d’água, como a construção de uma barragem e a formação do reservatório, aparecem depósitos de sedimentos no reservatório, ou seja: uma “agração” do leito, ou assoreamento do trecho a montante da barragem. Da mesma forma, há uma mudança drástica a jusante da barragem: por falta de descarga sólida de montante, que compense as erosões naturais do equilíbrio dinâmico, e por mudança no regime de escoamento, as águas começam a degradar o leito e as margens. Essa mudança pode ocorrer de duas formas: a granulometria do sedimento do leito aumenta pelo transporte dos finos até um equilíbrio ou a declividade do leito diminui. (CARVALHO, 1994), conforme apresentado a seguir.

e) O Processo de Assoreamento em Reservatórios

A construção de barragens e a formação de reservatórios modificam as condições naturais do curso d’água e geram uma redução nas velocidades da corrente, provocando a deposição gradual dos sedimentos carreados pelo curso d’água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento, podendo vir a comprometer a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas.

O estudo dos sedimentos e a magnitude do assoreamento têm importância fundamental em reservatórios de pequeno e médio portes, localizados em bacias de grande produção de sedimentos, pois à medida que estes ocupam o volume do reservatório, diminui sua capacidade e sua vida útil. A estimativa da vida útil de um reservatório pode decidir se o empreendimento é viável ou não. Por outro lado, os sedimentos que passam pelas turbinas, máquinas, comportas e pelo

vertedouro causam problemas de abrasão nos condutos, equipamentos e demais estruturas. A jusante da barragem, a água limpa, sem sedimentos, associada à modificação do regime de vazões, pode provocar erosões do leito e margens do rio, chegando, em alguns casos, a afetar a fundação da própria barragem.

A quantidade de sedimentos depositada num reservatório depende da quantidade transportada pelo rio. E a quantidade transportada depende de vários fatores, dentre eles da macro localização do reservatório, pois em regiões tropicais, onde a incidência de chuvas é maior e onde os desmatamentos têm efeitos mais devastadores que em regiões temperadas, os solos são mais suscetíveis à erosão. As chuvas, aliadas ao tipo, ao uso e à ocupação dos solos da bacia hidrográfica situada a montante, determinam a quantidade de sedimentos que será encaminhada ao reservatório.

As demais fontes de sedimentos associadas a reservatórios são as áreas de empréstimo e de bota fora da própria obra de barramento que não tenham sido devidamente tratadas e os barrancos instáveis nas margens do reservatório. Além disso, a mudança no uso do solo da bacia, estimulada pela criação do reservatório, pode levar à substituição das florestas naturais por áreas destinadas à atividades agropecuárias, o que concorre para agravar o processo de erosão dos solos.

O curso d'água, ao entrar no reservatório, encontra seções de escoamento mais amplas, trazendo como resultado a redução das velocidades da corrente, criando condições para deposição dos sedimentos. As partículas mais graúdas são as primeiras a depositar, enquanto as mais finas penetram no reservatório. Este processo tem, como aspecto positivo, o fato de promover a limpeza da água para seus diversos usos (CARVALHO, 1994).

A medida que o assoreamento cresce, a capacidade do reservatório diminui, a influência do remanso aumenta para montante, as velocidades no lago aumentam e maior quantidade de sedimentos passa a escoar para jusante. Nessas condições os problemas de abrasão aumentam, pois o diâmetro do material que passa pelos equipamentos é maior.

Os sedimentos se distribuem de maneira não uniforme no reservatório, conforme esquema da Figura 4.3.19. À deposição de montante se denomina “depósito de remanso”. As deposições internas ao lago são denominadas de “delta”, “depósito de margem” e “depósito do leito”. O “delta” se forma com sedimentos grossos, de granulometria maior que 0,062 mm (CARVALHO et al., 2000) e os “depósitos interiores” (do leito) com sedimentos finos ($< 0,062$ mm). A passagem das cheias produz outro tipo de deposição no rio e no reservatório, que é o “depósito de várzea” ou “depósito de planície de inundação”, formado por sedimentos finos e grossos.

Os depósitos mencionados causam diferentes impactos ou consequências. Os de remanso criam problemas de enchentes a montante e podem dificultar a navegação. Os depósitos internos ao reservatório provocam a redução na sua capacidade, sendo que o delta reduz a capacidade útil e também o volume morto, enquanto que os depósitos do leito reduzem o volume morto.

O “depósito de várzea” facilita o crescimento de plantas aquáticas, que são removidas pela elevação do nível d’água, passam a flutuar no reservatório até apodrecer e se depositar no fundo do lago, aumentando o assoreamento, ou até atingir as tomadas d’água, perturbando a operação da barragem. A vegetação flutuante também pode prejudicar o uso recreacional do reservatório e a navegação. Os sedimentos do fundo do lago produzirão modificações da flora e da fauna, da mesma forma que a água limpa que escoar para jusante, sem os nutrientes transportados pelos sedimentos, irá alterar a flora e a fauna do rio, comprometendo a produção agrícola e pesqueira de jusante, além de facilitar o aparecimento de erosões na calha.

A sedimentação e erosão decorrentes da construção de barragens podem ser visualizadas na Figura 4.3.19 a seguir.

Figura 4.3.19 – Efeitos de uma Barragem sobre o Transporte de Sedimentos

Fonte: CARVALHO, 1994

f) Efeitos do Assoreamento na Geração de Energia Elétrica

Os problemas de assoreamento vêm se tornando mais comuns e preocupantes. Um relatório do Banco Mundial (MAHMOOD, 1987 apud CARVALHO, 1994), mostra que a vida útil média dos reservatórios da Terra decresceu de 100 anos para 22 anos, avaliando-se em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes assoreados. O problema de assoreamento é mais significativo em pequenas barragens e em barragens singulares localizadas no tramo de jusante dos rios (WCD, 2000).

Em 1978 existiam cerca de 5.000 km³ de água em reservatórios, sendo que, na época, a perda de capacidade média mundial por ano devida ao depósito de sedimentos foi estimada em 1%, o que correspondia a 50 km³ de capacidade de reservação por ano (CARVALHO, 1994). No Brasil a perda anual de capacidade de armazenamento foi estimada em 0,5% (CARVALHO, 1994). Na ocasião, a

capacidade de todos os reservatórios de hidrelétricas brasileiras não alcançava 400 km³, portanto, pode-se dizer que a perda de capacidade dos reservatórios por assoreamento era de 2 km³ ao ano. Isto excede a capacidade de vários reservatórios de hidrelétricas em operação no Brasil.

Atualmente, cerca de 90% da energia elétrica consumida no Brasil provem de fontes hidráulicas (ANEEL, 2002), o que justifica a elaboração de estudos sedimentológicos detalhados. Até a última década, estes estudos não eram muito detalhados porque a maior parte da geração hidrelétrica (80%) se concentrava em apenas 17 usinas, com reservatórios de mais de 1 km³ (CARVALHO, 1994). Os tempos para assoreamento destes reservatórios excediam 100 anos, superando a vida útil dos aproveitamentos e, portanto, era considerado um problema de pequena importância.

Hoje, sabe-se que existem diversos reservatórios assoreados no Brasil e estima-se que muitos outros estejam comprometidos, não se conhecendo a situação efetiva por falta de levantamentos batimétricos sistemáticos e de divulgação dessas informações.

g) Estimativa dos Sedimentos Depositados em Reservatórios

A metodologia detalhada para os cálculos, adequada às diversas fases de estudo, encontra-se na bibliografia citada (CARVALHO, 1994 e CARVALHO et al, 2000) apresentando-se aqui apenas um resumo para estimativas preliminares.

Na fase inicial do projeto de um aproveitamento deve-se obter os seguintes dados:

- levantamento das condições de erosão da bacia (uso do solo, desmatamento, etc);
- levantamento dos postos sedimentométricos existentes;
- coleta dos dados hidrológicos e sedimentológicos necessários;
- estudos existentes sobre o tema.

Na falta de dados há a necessidade de instalação de estações hidrossedimentométricas e pluviométricas na bacia. Em paralelo pode-se trabalhar, na fase de inventário ou planejamento, com dados de estudos de regionalização ou obtidos por meio de cálculos das perdas de solo por erosão por modelos paramétricos, como o USLE, já mencionado. O objetivo desses estudos é o cálculo do deflúvio sólido afluente total médio anual ao reservatório (Dst).

Nos casos em que se dispõe apenas da concentração média mensal de sedimentos, a descarga sólida em suspensão pode ser obtida, para cada mês da série de vazões médias, por:

$$Q_{ss} = 0,0864 \cdot Q \cdot C \quad (4.9)$$

onde:

Q_{ss} = descarga sólida em suspensão, em t/dia;

Q = descarga líquida média de cada mês da série, em m^3/s ;

C = concentração de sedimentos média mensal, em mg/l

A descarga em suspensão é normalmente a parte predominante da descarga total, representando, na maior parte das medições, mais que 90% do total. Para a descarga sólida do leito, ou de arrasto, podem ser utilizados dados de medição direta, de fórmulas ou por meio da arbitragem de valores. No Brasil é comum arbitrar-se, para rios de planície, até 10% da descarga em suspensão para a descarga do fundo, enquanto que em outros países são arbitrados até 30% da descarga em suspensão. No entanto, a descarga do leito pode representar valores desde 10% até 150% da descarga em suspensão, conforme conclusão do estudo realizado pelo ICOLD e resumido na Tabela 4.3.17 a seguir (ICOLD, 1989 apud CARVALHO, 2000).

A descarga sólida total pode ser obtida pela soma da descarga sólida em suspensão e do leito ou pelos métodos modificado de Einstein e simplificado de Colby.

Tabela 4.3.17 – Guia para Correção da Descarga do Leito e para Orientação do Método de Obtenção dessa Descarga.

CONDIÇÃO	CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO (mg/l)	MATERIAL DO LEITO	GRANULOMETRIA DO MATERIAL DO LEITO	% DE CARGA DO LEITO EM RELAÇÃO À CARGA EM SUSPENSÃO
1 (1)	< 1000	Areia	20 a 50% de areia	25 a 150
2 (1)	1000 A 7500	Areia	20 a 50% de areia	10 a 35
3	> 7500	Areia	20 a 50% de areia	5
4(2)	Qualquer concentração	Argila compactada, pedregulho, pedras roladas ou pedras	Qualquer quantidade até 25% de areia	5 a 15
5	Qualquer concentração	Argila e silte	Nenhuma areia	< 2

- (1) Amostragens especiais para cálculos pelo método modificado de Einstein são necessárias para essa condição
- (2) Um programa de medições diretas com um amostrador tipo Helley-Smith, ou outro medidor, ou mesmo o uso das fórmulas para material grosso

Fonte: ICOLD,1989 apud CARVALHO, 2000

O deflúvio sólido total médio anual afluente é calculado então pela soma das descargas sólidas totais médias mensais, por:

$$Dst = \sum_{i=1}^{12} Q_{ssi} \cdot n_i \quad (4.10)$$

onde:

Dst = deflúvio sólido total médio anual afluente, em t/ano;
 Qssi = descarga sólida total média para o mês “i”, em t/dia;
 ni = no. de dias do mês “i”.

Na fase de inventário é suficiente estimar o tempo de assoreamento total e a vida útil do aproveitamento. Nas fases de viabilidade e projeto básico os estudos deverão ser mais detalhados, procurando-se soluções para o controle dos sedimentos, se resultarem volumes significativos. Na fase de operação o assoreamento deve ser monitorado através de levantamentos batimétricos periódicos.

Quando estiverem disponíveis os dados de postos fluviossedimentométricos no local da obra, deve-se calcular a curva chave de sedimentos, que permite obter a descarga sólida em função da descarga líquida, da seguinte forma:

$$Q_{ST} = a.Q^n \quad (4.11)$$

onde:

Q_{ST} = descarga sólida total, t/dia;

Q = descarga líquida, m³/s;

n e a = constantes

Com a descarga sólida total pode-se calcular o deflúvio sólido total médio anual afluyente ao reservatório:

$$D_{ST} = 365 \times Q_{ST} \quad (4.12)$$

Por fim calcula-se o volume depositado por ano e o tempo para o assoreamento de um determinado volume, através das fórmulas:

$$V_s = 2 \cdot D_{ST} \cdot E_r / \gamma_{ap} \quad (4.13)$$

$$T = V_{res} / V_s \quad (4.14)$$

onde:

V_s = volume de sedimentos depositado no reservatório, em m³/ano;

D_{ST} = deflúvio sólido total médio anual afluyente, em t/ano;

2 = fator multiplicativo do D_{ST} , para prever um aumento da produção de sedimentos com o tempo;

E_r = eficiência da retenção de sedimentos, em decimal;

γ_{ap} = peso específico aparente do sedimento, em t/m³;

T = tempo para assoreamento de um determinado volume, em anos;

V_{res} = volume do reservatório, em m³.

A eficiência de retenção E_r é definida como a razão entre a quantidade de sedimento depositado e o fluxo total de sedimento afluente. Depende basicamente das velocidades de queda das partículas e da velocidade do escoamento no reservatório. Pode ser obtida por medições sistemáticas das descargas sólidas afluente e efluente da barragem. O método empírico mais conhecido e usado para médios e grandes reservatórios é o de Gunnar Brune, das curvas envoltórias, apresentado na Figura 4.3.20 a seguir e, para pequenos reservatórios, o de Churchill (CARVALHO et al., 2000).

Figura 4.3.20 – Curvas de Eficiência de Retenção de Sedimentos em Reservatórios, Segundo Brune.

Fonte: CARVALHO et al., 2000.

Na abcissa tem-se a capacidade de afluência, que é a razão entre o volume total do reservatório no nível d'água máximo normal e o volume líquido afluente médio anual. Com a capacidade, entra-se no gráfico de Brune e obtém-se a porcentagem de sedimentos retidos.

Quanto ao peso específico aparente, sabe-se que depósitos em reservatórios têm o peso específico variável no tempo devido à compactação pelo peso da água e do próprio sedimento. Segundo as pesquisas de LARA E PEMBERTON (apud CARVALHO, 1994), o peso específico aparente dos depósitos de sedimentos em um

reservatório pode ser calculado, principalmente, em função do tipo de operação desse reservatório, do grau de compactação dos sedimentos e de sua granulometria. Na falta de dados, pode-se adotar um valor aproximado para γ_{ap} . Como o assoreamento é calculado, em geral, para 100 anos de vida do aproveitamento, pode-se utilizar os valores da Tabela 4.3.18 a seguir.

Tabela 4.3.18 – Peso Específico Aparente Estimado

MATERIAL DO DEPÓSITO	γ_{ap} (t/m ³)	
	T = 0	T = 100 anos
Argila	0,42	0,82
Silte	1,12	1,17
Areia	1,554	1,554
Argila/Silte/Areia*	1,03	1,21

* Em parte iguais

Fonte: LARA; PEMBERTON apud CARVALHO, 1994

Com o volume de sedimentos depositado anualmente no reservatório, pode-se estimar, além do volume depositado em 100 anos, o tempo de assoreamento para qualquer volume característico do reservatório, como o da soleira da tomada d'água, o mínimo operacional, etc, partindo-se da suposição aproximada de que ocorrerá o preenchimento uniforme do volume, a partir do fundo do reservatório.

Nas fases posteriores de projeto, quando se dispuser de mais dados do local da barragem, poderá ser calculada a altura dos sedimentos no pé da barragem e sua distribuição no reservatório (STRAND, 1974 apud CARVALHO, 1994). E quando a barragem estiver em operação os estudos devem prosseguir, incluindo o monitoramento da rede fluviossedimentométrica e levantamentos batimétricos sistemáticos do reservatório.

h) Efeitos secundários devidos aos sedimentos

Além dos impactos físicos decorrentes do assoreamento de reservatórios existem outros impactos secundários que devem ser considerados e que podem se estender além dos limites do reservatório e da própria área de atuação do Empreendedor.

Dentre eles tem-se os efeitos do remanso do reservatório, provocados pela formação do delta, que vai estrangulando o canal do rio e reduzindo a declividade do fundo. Em consequência os efeitos do remanso do reservatório também aumentam, tornando as cheias mais freqüentes a montante.

Outras alterações são as referentes à qualidade da água do reservatório, uma vez que os sedimentos carregam nutrientes, que na condição lântica do reservatório alteram as características da água.

Os efeitos dos depósitos de sedimentos na fauna e na flora são decorrentes da alteração do seu habitat natural. Os sedimentos em suspensão no reservatório reduzem a penetração da luz solar, o que também altera o habitat natural. Os sedimentos depositados nas margens do reservatório favorecem o aparecimento de macrófitas aquáticas, que, com a elevação do NA, são arrancadas e se decompõe no lago, ou podem prejudicar as tomadas d'água.

Outros efeitos do reservatório sobre os sedimentos dizem respeito à formação natural de praias nos rios, os bancos de areia, que permitem a recreação da população ribeirinha. Os bancos de areia da área do reservatório são inundados e os de jusante podem desaparecer por falta de reposição de sedimentos, que agora ficam retidos na barragem.

i) Impactos a jusante da barragem

A redução do transporte de sedimentos e nutrientes a jusante de barragens tem impacto no canal, na planície de inundação e na morfologia costeira, do delta, e pode causar a perda do habitat aquático de peixes e outras espécies. A retenção dos sedimentos na barragem impede a refertilização das várzeas, com consequências danosas à agricultura e à produção pesqueira. A alteração da turbidez da água pode afetar diretamente a biota, como, por exemplo, a produção de plâncton. Se a turbidez é reduzida devido ao barramento, o desenvolvimento do plâncton a jusante pode aumentar e pode ocorrer em novos trechos do rio.

A redução de sedimentos pode levar à degradação do rio a jusante, eliminando praias e mangues que se constituíam em habitat de peixes nativos e reduzindo ou

até eliminando a vegetação ripária, que produzia os nutrientes e habitat para espécies aquáticas e de aves, dentre outros.

Pode produzir o aprofundamento do leito e erosão das margens do canal de jusante da barragem. Estruturas no canal, tais como pontes ou tubulações, podem ser danificadas, propriedades agrícolas, industriais ou residenciais localizadas nas margens podem ficar comprometidas.

A degradação dos deltas costeiros devida à redução no aporte de sedimentos também é uma consequência da construção de barragens. A lenta formação do Delta do Nilo foi revertida com a construção da Barragem do Delta em 1868. Hoje, outras barragens do Nilo, principalmente Assuã, que retém 100 milhões de toneladas de sedimentos por ano, reduziram ainda mais o aporte de sedimentos que alcança o delta, resultando que a linha da costa do delta está erodindo, em média, entre 5 e 8 m por ano, tendo sido registrado até 240 m por ano em alguns locais.

As consequências se estendem por longos trechos de costa, onde o efeito erosivo das ondas não é mais compensado por novos aportes de sedimentos trazidos pelos rios. Estima-se que as linhas da costa do Togo e de Benin estão sendo erodidas à taxa de 10 a 15 m por ano, por causa da Barragem de Akosombo, no rio Volta, em Gana, que interrompeu o abastecimento de sedimentos para o mar.

Outro exemplo é o rio Rhone, na França, onde uma série de barragens reduziu a quantidade de sedimentos transportados ao Mar Mediterrâneo, de 12 milhões de toneladas no Século XIX para apenas 4 a 5 milhões de toneladas atualmente. Isto levou a taxas de erosão superiores a 5 m por ano nas praias das regiões de Camargue e Languedoc, exigindo estruturas de proteção costeira que consumiram milhões de dólares.

No Brasil tem ocorrido problemas no delta do rio São Francisco, que tem sido erodido continuamente após a implantação da cascata de aproveitamentos hidrelétricos.

O fenômeno de erosão da calha do rio a jusante do barramento acontece sempre que a tensão de arraste do escoamento liberado pela barragem for maior que a resistência do material do leito. Antes da barragem, o leito poderia estar em equilíbrio dinâmico, pois, mesmo que as tensões de arraste do escoamento fossem superiores à resistência do material, havia uma reposição dos sedimentos retirados pelos que provinham de montante, o que não mais ocorre após o barramento.

O escoamento natural do rio transportando sedimento está normalmente num estado de quase equilíbrio, sem tendências para aggradação ou degradação a longo prazo. Esse regime de equilíbrio pode ser expresso por (LANE, 1954 apud CARVALHO, 1994):

$$Q_{sa} \times D = K \times Q \times I$$

onde:

Q_{sa} = descarga do material do leito;

D = diâmetro médio das partículas do leito;

K = constante de proporcionalidade;

Q = descarga líquida;

I = declividade do leito.

Esta equação pode ser representada por uma balança, conforme Figura 4.3.21 a seguir. Se qualquer uma das quatro variáveis for alterada, uma ou mais das outras devem sofrer mudança para restituir o canal ao estado de equilíbrio.

O processo de degradação se move progressivamente para jusante, até que alcance um ponto onde o sedimento que está sendo transportado seja de novo suficiente para manter o canal estável ou em equilíbrio.

Figura 4.3.21 – Relacionamento entre os Fatores que Contribuem para o Equilíbrio Estável num Rio.

Fonte: LANE, 1954 apud CARVALHO, 1994

A altura ou quantidade de degradação que poderá ocorrer no rio a jusante de uma barragem depende do material do leito. Caso exista material de maior granulometria em quantidade suficiente, que não possa ser transportado pelas descargas normais do rio, uma camada protetora se desenvolverá à medida que o material mais fino é deslocado e transportado para jusante. A degradação vertical será progressivamente mais lenta, até que uma armadura de espessura suficiente permaneça a determinada profundidade do leito, inibindo o processo.

Se, no entanto, o material do leito é de menor granulometria, transportável até profundidades maiores que as admissíveis, o canal mudará a declividade, até que alcance uma declividade estável, menor que a original.

Outra forma de atingir o equilíbrio é através da erosão e rebaixamento do leito, quando são encontrados materiais mais resistentes que limitam o efeito erosivo e fixam, assim, o leito, através de soleiras naturais estáveis.

Para estimar a degradação do canal é necessário conhecer a descarga dominante e as características do canal. A descarga dominante é definida como uma vazão líquida constante, representativa da vazão natural, que, por sua vez, é variável no tempo. No caso de canais naturais é utilizada a vazão de transbordamento ou a vazão correspondente à recorrência de dois anos. Para canais onde se tem um reservatório a

montante, a descarga dominante dependerá da operação da barragem. Assim, se o escoamento para jusante é quase uniforme, com raras descargas de enchente, pode-se utilizar a descarga média diária como descarga dominante. Caso haja maiores variações devido à enchentes, pode-se admitir a vazão de recorrência de dois anos.

As características do canal serão definidas por uma seção transversal típica, pela declividade longitudinal do fundo, admitida igual ao gradiente hidráulico. É também necessário conhecer o material do leito, por meio de amostras retiradas ao longo do trecho em estudo e em diferentes alturas na zona de possível degradação.

Deve-se inicialmente verificar se existe condição para a formação da armadura no leito. Em geral, se o leito apresenta, no mínimo, 10% de material com diâmetro de armadura ou maior, pode-se prever a formação dessa camada. Na Figura 4.3.22 a seguir tem-se o esquema de formação da camada de armadura.

Figura 4.3.22 – Camada de Armadura

Fonte: ICOLD, 1989 apud CARVALHO et al, 2000

Da figura resulta que:

$$y_a = y - y_d \quad (4.16)$$

onde:

y_a = espessura da camada de armadura, m;

y = altura do leito original, m;

y_d = altura de degradação, m;

D_c = diâmetro do material de formação da armadura, m.

Por definição:

$$y_a = (\Delta p) \cdot y \quad (4.17)$$

onde:

Δp = porcentagem de material de diâmetro maior ou igual ao de armadura

Portanto:

$$y_d = y_a [(1/\Delta p) - 1] \quad (4.18)$$

A espessura “ y_a ” varia com o diâmetro da partícula, mas é geralmente adotada como 3 vezes o diâmetro D_c ou 0,15 m.

O diâmetro D_c pode ser calculado por diversos métodos (CARVALHO et al., 2000): velocidade crítica do leito, força trativa, equação de Meyer – Peter & Muller e equação de Schoklitsch.

A Figura 4.3.23 a seguir mostra a variação da granulometria ao longo do tempo, a jusante da barragem Hoover Dam, no rio Colorado (WILLIAMS; WOLMAN, 1984 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986), após 1, 3, 6 e 13 anos do fechamento da barragem e ao longo de 140 km. A alteração da granulometria do material ao longo dos anos é também apresentada na Figura 4.3.24, em três seções do rio Colorado a jusante de Parker Dam (WILLIAMS; WOLMAN, 1984 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986).

Figura 4.3.23 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Hoover, no rio Colorado

Fonte: WILLIAMS AND WOLMAN, 1984 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986

Figura 4.3.24 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Parker, no rio Colorado

Fonte: WILLIAMS; WOLMAN, 1984 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986

Quando o material grosso do leito não é suficiente para a formação da camada de armadura, calcula-se a declividade estável, que é a declividade do rio na qual o material do leito não mais será transportado. Permite calcular a altura de erosão do leito imediatamente a jusante da barragem e assim definir a fundação da barragem e/ou obras de proteção do leito. O processo é conhecido como o método da declividade tripla (ICOLD, 1989 apud CARVALHO et al., 2000). A declividade estável pode ser obtida por diversos métodos, como: a equação de Meyer-Peter & Muller para início de transporte, a equação de Schoklitsch para transporte nulo de sedimentos, o gráfico de Shield para nenhum deslocamento de partículas e as relações de Lane para força trativa crítica, assumindo escoamento de águas limpas em canais. Estas previsões podem ser feitas quando se tem um leito formado por sedimentos aluvionares de dimensões uniformes. Ultrapassada esta camada, atinge-se o solo natural com características totalmente heterogêneas, que dificultam a previsão das erosões.

A erosão ou a capacidade de erosão do leito é mais intensa junto à barragem, atenuando o seu efeito para jusante, pois parte do material transportado será substituído pelo material erodido, vindo de montante, do pé da barragem. Na Figura 4.3.25 é apresentada a evolução da cota do fundo do rio Ratmau, a jusante do vertedouro, num trecho de 14 km de extensão, no período de 123 anos, de 1845 a 1968 (COLDWELL, 1947 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY 1986).

Figura 4.3.25 – Alteração da Cota de Fundo do rio Ratmau a Jusante do Vertedouro do Canal Ganga

Fonte: COLDWELL, 1947 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986

Em alguns casos poderá ocorrer, a partir de uma certa distância da barragem, o efeito de assoreamento do leito, conforme apresentado na Figura 4.3.26. Após o fechamento do rio Visla em Vlotzlavk, ocorreu erosão do leito e das margens a jusante. A variação diária do NA a jusante é superior a 3 m, acarretando uma variação rápida na declividade da lâmina d'água, que chega a valores de 2 a 4 vezes superiores à declividade média natural de longo termo. A erosão se iniciou após o fechamento do rio na região pé da barragem, progredindo, a seguir, para jusante, como uma “onda erosiva”. Numa estimativa do volume erodido em 4 anos, um autor concluiu que mais que $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ do material do leito foi retirado nos 10 km de jusante da barragem (BABINSKI, 1982 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986), provocando um rebaixamento médio de 0,43 m no leito. O ponto de maior erosão ocorreu 67 m a jusante da barragem e atingiu 2,50 m de profundidade. A areia e o cascalho removidos nos 4 anos, num total de $11 \times 10^6 \text{ m}^3$, foi depositado no rio, no trecho entre 10 e 18 km abaixo da barragem, causando uma

elevação média de 0,21 m. Como resultado da erosão, o material do leito se tornou mais graúdo, sendo que o diâmetro médio aumentou 10 vezes numa seção 200 m a jusante e 1,5 vezes a 4 km de distância da barragem.

Figura 4.3.26 – Degradação a Jusante da Barragem Vlotzlavski, rio Visla, após 4 anos do Fechamento da Barragem

Fonte: BABINSKI, 1982 apud RAYNOV; PECHINOV; KOPALIANY, 1986

4.3.2.4 – Elevação dos Níveis das Águas Subterrâneas com o Enchimento do Reservatório

a) Generalidades

Uma das mais importantes modificações decorrentes do enchimento de reservatórios se processa no subsolo, já que volumes significativos de água oriundos da represa percolam para seu interior, constituindo novos aquíferos ou realimentando aquíferos livres já existentes. A elevação do lençol freático, que se propaga para a área do entorno, pode resultar em uma alteração de umidade subsuperficial dos solos.

A relação do curso d'água natural com o aquífero livre adjacente é de receptor de água, sendo alimentado pelo aquífero, na maior parte do tempo, exceto nos eventos de cheias, quando o volume escoado pelo rio é significativamente superior ao recebido das descargas subterrâneas.

O lençol freático, por sua vez, oscila natural e sazonalmente de acordo com os períodos chuvosos e secos, em torno de uma posição média.

Esse impacto pode ter sentido positivo e negativo, dependendo do uso e ocupação dos terrenos no entorno do reservatório. As modificações que ocorrerão no regime hidrológico subterrâneo serão tanto maiores quanto maior for a barragem, sua área de inundação e a espessura média da lâmina d'água resultante da formação do reservatório.

O equilíbrio dinâmico original vale/aquífero é rompido pelo enchimento do reservatório. Numa fase inicial, a superfície da água subterrânea sofre reajustes transitórios, passando para mudanças permanentes a longo prazo, conforme esquema apresentado na Figura 4.3.27 a seguir (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Figura 4.3.27 – Modelo Esquemático da Evolução do Processo de Elevações Induzidas no Lençol Freático nas Bordas de Reservatório

Fonte: ALBUQUERQUE FILHO, 2002

Na fase de fluxo transitório, o rio, que recebia as águas das descargas subterrâneas, após ter seu nível elevado pelo represamento, passa a alimentar o aquífero, resultando na inversão no sentido do fluxo, do reservatório para o aquífero.

O equilíbrio do novo regime hidrogeológico será restabelecido após um longo prazo e de forma permanente. As cargas hidráulicas do aquífero aumentam, com

tendência geral de decréscimo da ação a partir da barragem em direção a montante e das bordas do reservatório em direção aos limites da bacia. Por outro lado, os gradientes hidráulicos são suavizados, diminuindo a descarga de base do aquífero para o reservatório.

A relevância da alteração do nível d'água subterrâneo dependerá de como se considera essa água, se como recurso hídrico ou como agente ativo nos processos naturais do meio físico, e também do uso e ocupação dos solos, existente ou pretendido, no entorno do reservatório. No primeiro caso, a elevação regional do NA subterrâneo pode ser benéfica, por permitir a captação mais fácil e a menores custos. Também pode favorecer as condições de cultivo, pela melhoria da umidade dos solos superficiais. No entanto, caso os níveis d'água subterrâneos sejam originalmente rasos, as elevações induzidas pelo enchimento do reservatório podem comprometer a utilização dos terrenos vizinhos. Quando o NA se encontra muito próximo à superfície pode ocorrer a saturação dos solos e o afogamento das raízes, acarretando prejuízos à flora local e possibilitando a salinização – particularmente em regiões de clima quente – diminuindo a capacidade de produção agrícola da área, ou possibilitando a formação de nascentes e lagoas em zonas topograficamente mais deprimidas (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Outro aspecto resultante da elevação do lençol freático poderá ser o adensamento volumétrico de solos anteriormente com baixos teores de umidade e com estruturação interna instável (solos colapsíveis), com a conseqüente diminuição de sua capacidade de suporte de carga e modificação na estabilidade geotécnica, podendo resultar em movimentações nas fundações e potencializar danos estruturais nas edificações existentes no entorno do reservatório.

As surgências de água que porventura ocorram poderão causar a formação de processos erosivos, dependendo das condições do solo superficial atingido. Outro problema decorrente da elevação do lençol freático é a diminuição da espessura do horizonte não saturado e, como resultado, o aumento da vulnerabilidade do aquífero a contaminações oriundas da superfície do terreno, uma vez que o horizonte não saturado atua como um filtro natural. Ou ainda, o afogamento de

estruturas anteriormente edificadas no subsolo, proporcionando novo ambiente químico, muitas vezes com reações adversas para os diferentes materiais presentes.

Os efeitos da elevação do lençol nos terrenos que margeiam o reservatório encontram-se resumidos a seguir (IPT, 1989c apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002):

- “aumento da umidade do solo, que poderá implicar alteração das suas características de estabilidade estrutural natural e, como consequência, afetar fundações ou estruturas nele assentes;
- saturação do subleito de vias, que poderão sofrer recalques diferenciais, devido às cargas aplicadas;
- corrosão de estruturas enterradas, tais como: fundações, canalizações, reservatórios, dentre outros, podendo causar danos mútuos (estrutura/meio-aquífero) pela troca de líquido estranho/pernicioso a cada um;
- condições de profundidades finais rasas, o que propicia o aumento da evapotranspiração e, por conseguinte, o aumento do conteúdo salino nos solos superficiais e sub-superficiais, o que poderá se tornar pernicioso às culturas ali desenvolvidas;
- condições de profundidades finais rasas, que poderão afogar raízes de plantas;
- aparecimento de surgências perenes em encostas e vales que, a depender da vocação do solo e de outros condicionantes locais (uso e ocupação, proteção vegetal, dentre outros), poderão se consubstanciar em agentes deflagradores de processos erosivos lineares;
- afloramento do lençol freático ao longo de voçorocas eventualmente já existentes, o que poderá induzir reativação (naquelas estabilizadas) ou aceleração do processo (naquelas ativas), por meio do carreamento de material nos pontos de surgência (piping);

- afogamento de fossas, o que poderá se consubstanciar em focos de contaminação do aquífero livre. A depender de cada caso (quantidade de fossas, principalmente), essa contaminação poderá ser apenas de caráter local ou mais abrangente;
- aumento da vazão de poços, como decorrência do aumento da espessura da lâmina d'água;
- desabamento das paredes de poços escavados (cacimbas) não-revestidos, provocado pela saturação e instabilização de tais trechos, em virtude da elevação do nível d'água em seu interior;
- formação de áreas permanentemente alagadas ou mesmo de lagoas perenes, em zonas topograficamente deprimidas, ou, ainda, aumento das dimensões das lagoas ou zonas úmidas já existentes;
- diminuição da descarga de base do sistema aquífero livre, em caráter regional, como consequência da diminuição dos gradientes hidráulicos subterrâneos, resultante da elevação do lençol freático”.

O impacto positivo da recarga dos aquíferos em decorrência do enchimento de reservatórios é variável entre os diversos países ou regiões, em função da disponibilidade hídrica local. Na antiga URSS, a implantação de reservatórios proporcionou, em alguns casos, uma alimentação do aquífero livre adjacente de tal porte, que o volume transferido ao aquífero superou a quantidade acumulada em superfície, no próprio reservatório (MEDOVAR; AKHMETYEVA, 1984 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Em regiões do Oriente Médio, são construídas barragens com a finalidade de recarregar os aquíferos, melhorando o seu desempenho alguns quilômetros a jusante.

No Brasil, a recarga do aquífero por reservatórios não tem sido suficientemente valorizada. Nas regiões sul e sudeste, onde existem inúmeros reservatórios e abundância de recurso hídrico superficial e subterrâneo não se estuda esse aspecto, da mesma forma que na região nordeste, cuja disponibilidade hídrica é bem menor.

b) Antecedentes

O primeiro estudo hidrogeológico sistemático, voltado para a avaliação da elevação do lençol freático por recarga a partir de corpos d'água superficiais, foi iniciado em 1928 (CADY, 1941 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). O estudo monitorou, por 10 anos, uma área aluvial no entorno do Flathead Lake (EUA), para avaliar os possíveis prejuízos à agricultura, decorrentes da elevação do NA médio do lago entre 1,20 m e 1,80 m.

Em 1962, REED e BEDINGER (apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002) apresentaram uma equação útil para estimar variações de carga hidráulica no aquífero semi-infinito ou extensivo, adjacente a reservatórios, apresentada a seguir.

O monitoramento, ao longo de 5 anos, de um reservatório construído no rio Dnyeper, nas estepes russas, entre 1955 e 1960, apresentou manifestações induzidas até cerca de 18 km da borda do reservatório, no último ano de medição (SMIRNOV; BAUER, 1962 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

O enchimento do reservatório South Saskatchewan, localizado no centro-oeste do Canadá, foi precedido de amplo estudo, compreendendo caracterização geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica detalhada de três aquíferos situados na área de influência do reservatório, sendo dois confinados e um livre. A elevação da lâmina d'água na barragem era de 56 m, o reservatório foi fechado em 1964 e o enchimento completo ocorreu apenas em 1968. Monitoramentos efetuados até 1971 mostraram que as elevações do lençol ainda não haviam se estabilizado e que se constatavam valores da ordem de 2 a 5 m a cerca de 5 km da borda do lago (VAN EVERDINGEN, 1972 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

No ano de 1964 foram iniciados estudos em uma grande barragem de terra em terrenos cristalinos da Polônia (LOZINSKA-STEPIEN; POZNIAK, 1979 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002), com vistas a avaliar os volumes extras de água armazenada no aquífero adjacente ao reservatório e sua variação no tempo. A

conclusão dos estudos foi que a quantidade extra de água subterrânea atingia 40% do volume acumulado no reservatório, à superfície.

A alimentação de água do reservatório para o aquífero freático ou através de camadas geológicas permeáveis adjacentes pode significar volumes intoleráveis e persistir indefinidamente como regime de fluxo transitório. Esse problema, de baixa estanqueidade do reservatório, pode inviabilizar o Empreendimento, já que o tratamento, por drenagem de rebaixamento e cortinas de impermeabilização, pode representar custos proibitivos. O reservatório de Oymapinar, no sul da Turquia, com barragem de 185 m de altura e volume de 310 milhões de metros cúbicos, localiza-se em terrenos com ocorrência de calcários e apresentou esse problema (ALTUG; OYMAGROUT, 1982 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Em 1986, quinze anos após a implantação do atual maior reservatório do mundo, o da Barragem de Assuã, no rio Nilo, Egito, com 500 km de extensão, 3.000 km² a 5.000 km² de área inundada, 121,3 x 10⁹ m³ de volume, gerando 2.100 MW, foi efetuado o balanço dos impactos ambientais prognosticados antes do enchimento (SMITH, 1986 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). A conclusão foi que, ao contrário de se constituir num desastre ecológico, a Barragem de Assuã propiciou ao Egito um número de benefícios que supera, de longe os impactos deletérios. O estudo ressalta, no entanto, que, dentre todos os impactos levantados, a água subterrânea excessiva era o mais significante.

Em 1997, quando a Barragem de Assuã completava 25 anos de operação, um novo estudo (ABU-ZEID; EL-SHIBINI, 1997 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002) confirmou que os benefícios e impactos altamente positivos no desenvolvimento social e econômico do país superaram as consequências ambientais desfavoráveis, as quais foram controladas com sucesso e apropriadamente tratadas e gerenciadas. Mesmo assim, relataram que a infiltração de água atingia 1 x 10⁹ m³/ano, na condição do reservatório no NAmáximo, o que correspondia a 10% do total evaporado. À elevação do lençol freático induzida pelo reservatório, os autores acrescentaram a elevação decorrente da irrigação intensiva da área.

No Brasil, estado de São Paulo, no início da década de 80, foram feitos os primeiros estudos específicos relacionados às modificações induzidas por reservatórios sobre os aquíferos adjacentes. A motivação para estes estudos decorreu de solicitações ou depoimentos efetuados à CESP sobre a subida do NA em cacimbas, encharcamento de terrenos, afogamento de fossas sépticas ou negras, dentre outros, feitos por moradores do entorno de reservatórios antigos, implantados nas décadas de 60 e 70 (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

O reservatório de Porto Primavera, no rio Paraná, foi selecionado para ser o primeiro a ser estudado, por se avizinhar o seu enchimento, que acabou acontecendo apenas no final de 1998. O reservatório, de 235 km de extensão, apresenta uma área de inundação de 2.250 km² e um volume de 20×10^9 m³, com lâmina d'água de 21,60 m junto à barragem. Os estudos efetuados buscaram estabelecer mapas de potencial de influência do enchimento do reservatório, conforme as faixas de terreno onde se previa que o lençol freático ficaria mais ou menos raso (IPT, 1982 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

No ano de 1985 iniciaram-se estudos de avaliação do processo de elevação do lençol freático sobre a cidade de Pereira Barreto, localizada cerca de 20 km a montante da barragem de Três Irmãos, no rio Tietê, em região de solos colapsíveis, e na área do reassentamento agrícola da Lagoa São Paulo, na margem esquerda do reservatório de Porto Primavera, cerca de 110 km a montante da barragem.

O primeiro RIMA para obra do setor elétrico no Brasil foi elaborado para a UHE de Segredo no ano de 1987 (GAZETA MERCANTIL, 1999 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). Os impactos da inundação, pelo reservatório, de 82 km² de área em terrenos basálticos, por uma barragem de 140 m de altura, incluíam a modificação do nível do lençol freático como significativa. Mencionava os impactos positivos, como a melhoria da captação das águas subterrâneas, e também os negativos, resultantes da oscilação do NA durante a operação do reservatório que, embora restritos a uma faixa de 50 m nos terrenos marginais, poderiam causar problemas de instabilidade nos taludes, nas fundações de edificações, nos poços de abastecimento de água, nas fossas de

dejetos domésticos, nas áreas agrícolas ribeirinhas e na vegetação natural remanescente.

– UHE Três Irmãos

Em 1989 os estudos hidrogeológicos para a cidade de Pereira Barreto, iniciados em 1985, foram prosseguidos (IPT, 1989a 1989c e 1989d apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). A intenção do estudo era fazer um prognóstico sobre a elevação do lençol freático na área urbana, induzida pelo reservatório da UHE Três Irmãos, e a avaliação do comportamento do solo quanto à colapsividade, nas porções situadas sob fundações de edificações e outros equipamentos urbanos. Nesse estudo foi avaliada também a influência do canal de ligação entre os reservatórios de Três Irmãos e de Ilha Solteira, em construção naquela época, o qual impunha inicialmente um rebaixamento, seguido pela elevação do lençol freático após o enchimento do reservatório.

Pereira Barreto se localiza 20 km a montante da barragem da UHE Três Irmãos, sendo que o fechamento do rio Tietê ocorreu em agosto de 1990, com o enchimento do reservatório se completando em março de 1991 (CESTARI JUNIOR; CELERI, 1999). A barragem de Três Irmãos tem 3.710 m de extensão e altura máxima de 82,6 m. Sua bacia hidrográfica tem 70.800 km² de área, quase um terço do território paulista, pois situa-se no baixo Tietê. O reservatório ocupa área de 817 km², com volume de 14×10^9 m³ e capacidade máxima de geração de 1.292 MW. Na Figura 4.3.28 a seguir apresenta-se um mapa de localização da cidade.

Figura 4.3.28 – Mapa de Situação da Cidade de Pereira Barreto, em Relação aos Reservatórios existentes na Região

Fonte: ALBUQUERQUE FILHO, 2002

A influência no lençol freático se daria em três frentes: pelo enchimento do reservatório de Três Irmãos e pela inundação de dois tributários, o Laranja Azeda, a oeste da cidade e o Ponte Pensa, a leste. Nesse último tributário foi construído o Canal de Pereira Barreto.

Além dos estudos hidrogeológicos através de modelagem matemática, foi feito um amplo e sistemático monitoramento, desde 1987 até o final do ano de 1994, acrescido de algumas medições efetuadas posteriormente.

Nos estudos teóricos foram construídos mapas de potencial de influência do enchimento do reservatório, segundo metodologias mais recentes e precisas, abrangendo todo o entorno do reservatório, além da cidade de Pereira Barreto.

O monitoramento mostrou elevações do lençol freático de até 20 m, induzindo desabamentos de paredes de poços – cacimba sem revestimento, recalques no solo e danos a edificações, levando a CESP a adotar uma série de medidas, como: reforço de estruturas ou reconstrução de cerca de 300 casas, reinstalação de rede de esgotos e estação de tratamento de esgoto,

construção de cemitério suspenso, remoção de antigo lixão, além de outras ações compensatórias da obra como um todo (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Em outro trabalho CESTARI JUNIOR; CELERI (1999) descreveram os estudos geotécnicos desenvolvidos e o monitoramento realizado nas edificações da cidade de Pereira Barreto, motivados pelas avaliações prévias de que o lençol freático sofreria grandes elevações após o enchimento do reservatório de Três Irmãos e que o solo local apresentava suscetibilidade elevada para a colapsividade. As conclusões do estudo foram que: as edificações situadas no interior da Zona B de influência, na qual o NA subterrâneo se estabilizou em profundidade superior a 5 m, não sofreram quaisquer danos em função da elevação do lençol freático; dentre as edificações situadas na Zona A, na qual a profundidade do NA subterrâneo ficou entre 0 e 5 m, sofreram danos as que haviam sido construídas sem critérios técnicos adequados.

– UHE Porto Primavera

Ao longo dos anos de 1997 a 1999 foram efetuados estudos hidrogeológicos para diversas cidades localizadas no entorno do reservatório, como: Anaurilândia (MS) e Panorama (SP), além de distritos urbanos, instalações, áreas de veraneio e de reassentamento agrícola localizadas nos municípios de Presidente Epitácio (SP), Paulicéia (SP), Três Lagoas (MS) e Castilho (SP).

O reservatório foi criado em duas etapas, sendo que a primeira, de fechamento do rio Paraná, realizada em novembro de 1998, elevou o NA de 243 m para 249 m. Como consequência, ocorreu um conjunto de manifestações de desmoronamentos em poços escavados no Assentamento Populacional XV de Novembro, localizado nos municípios de Euclides da Cunha e Rosana (SP). Essa área não havia sido incluída como suscetível à influências do enchimento nos estudos efetuados (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

c) Procedimentos para prognóstico da elevação do lençol freático

Para prever adequadamente a alteração nos aquíferos submetidos à influência direta de um corpo d'água superficial não natural, como um reservatório, pode-se utilizar alguns métodos ou sistemáticas de cálculo, conforme descrito a seguir (ALBUQUERQUE FILHO, 2002)

– Sistemática de Reed e Bedinger

A equação de Reed e Bedinger é útil para estimar variações de carga hidráulica no aquífero semi-infinito ou extensivo, adjacente a reservatórios. A equação parte da hipótese de que a variação do NA do rio após o barramento e no rumo montante, a partir do corpo da barragem, tem comportamento aproximadamente linear. Essa variação decresce continuamente ao longo de todo o canal do curso d'água até a extremidade longitudinal do remanso do lago formado, quando atinge valor nulo.

As amplitudes de ascensão no nível d'água para distintos pontos no aquífero adjacente são calculadas em função da altura da lâmina d'água na margem do reservatório, da distância do ponto em relação à barragem e à borda do lago.

Por essa metodologia, a influência da elevação do lençol é desprezível a montante da extremidade do remanso do reservatório e em todos os pontos a jusante da barragem.

As variações da carga hidráulica no aquífero devidas às modificações no NA natural do rio podem ser calculadas por (REED; BEDINGER, 1962 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002):

$$\Delta h = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x F(y) dz}{x^2 + (z - y)^2} \quad (4.19)$$

onde:

Δh = variação de carga hidráulica do aquífero semi-infinito, m;

$F(y)$ = variação na cota do nível d'água ao longo do limite do curso d'água/reservatório, m;

y = distância ao longo do curso d'água/reservatório, m;

x = distância perpendicular desde a borda do curso d'água/reservatório, m;

z = variável de integração, m.

As condições de contorno ao longo da borda do reservatório/curso d'água, ou seja, caso $x=0$, são mostradas na Figura 4.3.29 e podem ser expressas da seguinte forma:

$F(y) = 0$, se $y < 0$ (a jusante da barragem) ou $y > a$ (a montante do remanso do reservatório);

$F(y) = H - Hy/a$, se $0 < y < a$ (ao longo do reservatório).

Figura 4.3.29 – Variação da Espessura da Lâmina d'Água ao longo do rio após o Barramento, segundo Seção Longitudinal à Borda do Reservatório

Fonte: REED; BEDINGER, 1962 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002

A resolução da Equação (4.19), considerando-se a extensão do reservatório como um todo, resulta em:

$$\Delta h = \frac{1}{\pi} \int_0^a \left[H - \frac{Hy}{a} \right] \frac{x}{x^2 + (z - y)^2} dz \quad (4.20)$$

A partir da Equação (4.20), pode-se obter:

$$\Delta h = \frac{1}{\pi} \left[\left(H - \frac{H_y}{a} \right) \left(\arctan \frac{a-y}{x} + \arctan \frac{y}{x} \right) + \frac{H_y}{2a} \ln \left(\frac{x^2 + y^2}{x^2 + (a-y)^2} \right) \right] \quad (4.21)$$

onde:

Δh = variação de carga hidráulica no ponto (x,y) do aquífero, m;

H = espessura da lâmina d'água do reservatório na altura do eixo da barragem, m;

H_y = espessura da lâmina d'água ao longo da borda do reservatório, m;

a = extensão da represa, m.

A partir da Equação (4.21), pode-se calcular a distribuição da variação de carga hidráulica no aquífero adjacente ao reservatório, tal como mostrado na Tabela 4.3.19.

Tabela 4.3.19 – Matriz para Determinação da Distribuição da Variação de Cargas Hidráulicas (Δh) no Aquífero Livre na Margem de Reservatório

$\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}$	0,0a	0,2a	0,4a	0,6a	0,8a	1,0a	1,2a	1,4a	1,6a	1,8a
+1,2a	0,00H	0,05H	0,08H	0,09H	0,10H	0,09H	0,08H	0,08H	0,08H	0,07H
+1,0a	0,00H	0,10H	0,12H	0,13H	0,12H	0,11H	0,10H	0,09H	0,08H	0,08H
+0,8a	0,20H	0,22H	0,19H	0,17H	0,16H	0,12H	0,11H	0,11H	0,09H	0,08H
+0,6a	0,40H	0,32H	0,26H	0,21H	0,18H	0,14H	0,12H	0,11H	0,09H	0,09H
+0,4a	0,60H	0,43H	0,31H	0,23H	0,18H	0,15H	0,13H	0,11H	0,10H	0,09H
+0,2a	0,80H	0,47H	0,31H	0,22H	0,18H	0,15H	0,13H	0,11H	0,10H	0,09H
0,0a	1,00H	0,33H	0,25H	0,20H	0,16H	0,14H	0,12H	0,10H	0,09H	0,09H
-0,0a	0,00H	0,14H	0,17H	0,17H	0,14H	0,12H	0,11H	0,10H	0,09H	0,08H
-0,4a	0,00H	0,06H	0,10H	0,12H	0,12H	0,10H	0,10H	0,09H	0,08H	0,07H
-0,6a	0,00H	0,04H	0,07H	0,09H	0,09H	0,09H	0,09H	0,09H	0,08H	0,07H

Legenda:

a = extensão da represa

y = distância da barragem (- = a jusante + = a montante)

x = distância a partir da borda do reservatório

H = espessura da lâmina d'água no local da barragem

Fonte: REED; BEDINGER, 1962 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002

Os autores destacam que o método proposto supõe fluxo em equilíbrio estacionário, apesar de que lençol freático é afetado por vários agentes hidrológicos que se alteram ao longo do tempo, como: recarga a partir da precipitação pluviométrica, descarga pela evapotranspiração, exploração de água através de poços, etc. Além disso, os canais dos rios não são retilíneos, conforme idealizado na Figura 4.3.29; assim sendo a metodologia pode resultar em erros para rios com meandros, tanto menores quanto mais se afasta da margem do reservatório. Nas áreas de canais meandantes os autores recomendam a aplicação da Equação (4.21) conjugada com a aplicação de modelo de simulação.

Os dados da sistemática de REED e BEDINGER foram transformados em cartograma (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1976 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002), com a distribuição da elevação do NA subterrâneo em curvas de porcentual da altura da coluna d'água no local da barragem (H da Equação 4.21), conforme mostrado na Figura 4.3.30 a seguir.

Figura 4.3.30 – Curvas de Distribuição da Elevação do Nível d'Água Subterrânea nas Vizinhanças de um Reservatório

Fonte: CUSTÓDIO, LLAMAS, 1976 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002

– Outras Sistemáticas

Existem outras sistemáticas para o cálculo da elevação do lençol freático induzida pela formação de reservatórios (ALBUQUERQUE FILHO, 2002), tais como:

- Sistemática de MEDOVAR e AKHMETYEVA
- Sistemática de CRUZ e VERSIANI
- Sistemática de GUO
- Sistemática de LOCKINGTON
- Sistemática do IPT

Algumas dessas sistemáticas, como a de CRUZ e VERSIANI, dos bancos laterais, permite calcular a influência da operação do reservatório, depleção até o NA mínimo e reenchimento até o NA máximo, no NA do aquífero.

d) Comentários

Nos estudos desenvolvidos (ALBUQUERQUE FILHO, 2002) o autor constatou que, em muitos países, a preocupação com a elevação do lençol freático induzida por reservatórios é bastante antiga, sendo que em 1928 já se tinha estudos hidrogeológicos sobre o assunto. No Brasil essa preocupação existe há mais de 15 anos, entretanto, poucos empreendimentos foram objeto de estudos sistemáticos, prévios ao enchimento, que permitissem avaliar as consequências do enchimento do reservatório, tanto no aquífero freático, como no uso e ocupação das terras do entorno.

A adoção de Programas Ambientais com a finalidade de indicar as medidas para prevenção, mitigação ou compensação dos impactos negativos nem sempre é suficiente para o caso das águas subterrâneas. Segundo o autor, algumas medidas para correção ou mitigação do problema devem ser necessariamente avaliadas antes do enchimento, já que intervenções posteriores podem se tornar inviáveis técnica e/ou economicamente.

Após a instalação do reservatório, uma nova situação de equilíbrio dinâmico das águas subterrâneas pode demorar um período muito longo para acontecer, tendo sido relatado um caso em que esse período foi de 20 anos. Portanto, a avaliação

desse impacto deve ser considerada como um processo, a ser implementado antes do enchimento, sendo mantido durante e após sua conclusão.

Alguns empreendimentos hidrelétricos do estado de São Paulo tiveram programas ambientais estabelecidos e implementados, mas com duração exígua após o enchimento. Assim, os monitoramentos hidrogeológicos e geotécnicos sistemáticos, que permitiriam retroanálises e aferição de modelos e sistemáticas de cálculo, não foram efetuados em extensões suficientes no tempo e no espaço. Ou o foram de forma intermitente e irregular. Portanto, o autor conclui que há uma lacuna de conhecimento relativa à etapa mais importante, que é a do monitoramento pós-enchimento, e recomenda uma série de trabalhos complementares, dentre eles: a avaliação dos impactos positivos decorrentes do aumento das reservas de águas subterrâneas no entorno dos reservatórios e a elaboração de retroanálises, utilizando as sistemáticas apresentadas, em reservatório com série histórica adequada de monitoramento hidrogeológico.

Nos subitens e) a g) a seguir estão apresentados comentários relativos aos atributos, magnitude e relevância desse impacto na produtividade dos aquíferos, na formação de áreas úmidas e alagadas e na susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas, a partir de fontes de contaminação, decorrentes da elevação do nível freático e dos aquíferos confinados, atendendo ao disposto na Tabela 4.3.13.

Os impactos relativos à colapsividade e à expansividade dos solos, à instabilização, erosão e sismicidade induzida serão discutidos no Fator Ambiental **Terrenos**.

e) Acréscimo na Disponibilidade da Água Subterrânea e de Produtividade dos Aquíferos

O acréscimo na disponibilidade da água subterrânea e produtividade dos aquíferos trazem benefícios às populações, sendo um impacto positivo, de ocorrência certa, permanente e irreversível. Ocorre predominantemente quando do enchimento do reservatório e apresenta flutuações quando da variação do

nível d'água durante a operação. A magnitude desse impacto depende da altura da barragem e afeta, principalmente, as proximidades do lago, onde a elevação do nível poderá mostrar valores significativos. Quanto à relevância, deve-se avaliar se existem comunidades que possam receber os benefícios desse impacto e se o aquífero apresenta continuidade para jusante.

f) Formação de Áreas Úmidas e Alagadas

Nos trechos em que a borda do reservatório alcança terraços planos, o nível freático poderá aflorar nas depressões naturais ou artificiais (como em áreas de exploração de argila, areias e cascalhos) e nas áreas de topografia rebaixada, provocando alagamentos e/ou umedecimentos e interferindo com instalações e populações vizinhas e na exploração de argilas e de áreas de empréstimo.

É um impacto negativo, permanente e irreversível, que ocorre quando do enchimento do reservatório e oscila em função de variações do nível d'água durante a operação. A magnitude e a relevância dependerão das áreas atingidas, sendo mais grave se alcançarem áreas urbanas.

As regiões alagadas são consideradas grandes produtoras de metano, no entanto, são habitats ecológicos importantes. Como o reservatório pode inundar algumas regiões alagadas naturais, o aparecimento de novas áreas úmidas também pode ser considerado como uma compensação à manutenção da biodiversidade.

g) Acréscimo da Susceptibilidade à Contaminação dos Aquíferos

A susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas depende da proximidade com áreas urbanas, onde se localizam as principais fontes de contaminação. Para avaliar o risco de contaminação deve-se analisar a localização das principais fontes, obtidas nos planos diretores municipais, sobre o mapa geológico.

Dentre as fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas, citam-se depósitos de entulhos (que, a princípio, não devem ser fontes de contaminantes importantes), aterros sanitários, fossas, cemitérios e matadouros.

O acréscimo da susceptibilidade à contaminação das águas subterrâneas é um impacto negativo, pois apresenta aumento de riscos para as populações e representa degradação da qualidade das águas. É considerado de alta probabilidade de ocorrência em áreas onde as fontes de contaminação localizam-se sobre terraços. Poderá ocorrer de forma localizada, permanente e irreversível. A magnitude e a relevância do impacto dependerão da susceptibilidade dos aquíferos envolvidos e de sua importância.

4.3.2.5 – Variações dos Níveis das Águas Subterrâneas durante a Operação

Durante a operação do empreendimento, ocorrerão variações nos níveis do reservatório entre o NA máximo e o mínimo e, conseqüentemente, também ocorrerão variações do nível freático e de aquíferos confinados.

É um impacto negativo de ocorrência certa, localizado na borda do lago, temporário e reversível, mas os fenômenos gerados, em grande parte, são irreversíveis. As magnitudes e a relevância devem ser avaliadas tendo em vista sua influência em outros importantes impactos, também de relevância, como na potencialização da expansividade dos solos e na instabilização das encostas.

4.3.3 – Terrenos

A Tabela 4.3.20 apresenta o Quadro de Avaliação de Impactos sobre os terrenos.

Nos sub-itens seguintes são descritos os impactos correspondentes a este fator ambiental.

Tabela 4.3.20 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Terrenos

SUB FATOR	AÇÃO ⁽¹⁾	IMPACTOS	ATRIBUTOS					MAGNITUDE			GRAU DE RELEVÂNCIA	INSERÇÃO TERRITORIAL	MEDIDAS MITIGADORAS
			POSIT. NEGAT.	PROB. DE OCOR.	ALCANCE ESPAC.	DURAÇÃO	REVERS.	QUANTIFICAÇÃO		QUALIFICAÇÃO			
								ABSOLUTA	RELATIVA (%)				
ESTABILIDADE DOS TERRENOS MARGINAIS	7 e 9	POTENCIALIZAÇÃO DA COLAPSIVIDADE DE SOLOS E EXPANSIVIDADE DE SOLOS E ROCHAS	N	B	D	P	I			M	M	BORDA DO LAGO	MONITORAMENTO DE RECALQUES E EXPANSÃO
	2,4,6,7 e 9	INSTABILIZAÇÕES E EROSÕES NAS ENCOSTAS MARGINAIS	N	C	D	P	I			G	A	BORDA DO LAGO	MONITORAMENTO PROTEÇÃO SUPERFICIAL OBRAS DE CONTENÇÃO ÁREAS RESERVADAS
SISMICIDADE	7 e 9	SISMICIDADE INDUZIDA	N	A	D	P	I			P	B/M	ADA/AII	MONITORAMENTO SISMOLÓGICO
POTENCIAL AGRÍCOLA DAS TERRAS	2,4,5,6,7 e 9	PERDA DO POTENCIAL AGRÍCOLA DOS SOLOS INUNDADOS	N	C	L	P	I			M	M	ADA	
POTENCIAL MINERAL	7 e 9	INTERFERÊNCIA NOS DEPÓSITOS DE AREIA E CASCALHO	N	C	L	P	I			M	P	-	
	7e 9	INTERFERÊNCIA NOS DEPÓSITOS DE ARGILA	N	C	L	P	I			G	M		
RECURSOS CÊNICOS	7	ALTERAÇÃO DA PAISAGEM PELA FORMAÇÃO DO RESERVATÓRIO	N	C	L	P	I			G	M	ADA E ENTORNOS	TRATAMENTO PAISAGISTICO
	9	DEGRADAÇÃO DA PAISAGEM PELA OPERAÇÃO DA USINA	N	C	L	P	I			G	A	ADA E ENTORNOS	REGRAS DE OPERAÇÃO PREPARO DA ORLA DE PALMAS
	2,4,5,e 6 7	DEGRADAÇÃO DA PAISAGEM PELA EXECUÇÃO DE MOVIMENTOS DE TERRA E ROCHA	N	A	L	T	R			P	B	CANTEIRO DE OBRAS E ACESSOS, ÁREA DE EMPRESTIMO E BOTA-FORA	RECOMPOSIÇÃO PAISAGÍSTICA

(1) - Ações: 1 - Aquisição de Áreas; 2 - Adequação de acessos e instalação de Canteiro e Acampamento; 3 - Operação do canteiro e do acampamento; 4 - Abertura e exploração de jazidas e área de empréstimo e limpeza de terrenos para implantação das obras; 5 - Desvio do rio; 6 - Construção da Barragem, do vertedouro e da Tomada d'Água e Casa de Força; 7 - Enchimento do reservatório; 8 - Conclusão das obras; 9 - Operação da barragem e da usina.

OBS.: Impacto : N - Negativo, P - Positivo;
 Probabilidade de Ocorrência : C - Certa, A - Alta, B - Baixa;
 Alcance Espacial : D - Disperso, L - Localizado;
 Duração : P - Permanente; T - Temporária;
 Reversidade : R - Reversível, I - Irreversível;
 Magnitude : P - Pequena, M - Média, G - Grande;
 Grau de Relevância : A - Alto, M - Médio, B – Baixo

Fonte: THEMAG, 1996

4.3.3.1 – Potencialização da Colapsividade de Solos e Expansividade de Solos e Rochas de Fundações

a) Potencialização da Colapsividade de Solos

Solos colapsíveis são os que apresentam uma considerável e rápida redução de volume quando submetidos a um aumento brusco de umidade, sem variar a tensão total a que são submetidos. Esses solos têm, como características, baixa compactidade (SPT até 2), e têm sido verificado que os seus comportamentos estão intimamente relacionados com as suas estruturas. Micronódulos de partículas de argila em estado floculado podem “cimentar” partículas maiores de quartzo, quando secas. Quando da imersão dos solos e nova ocorrência de recalques diferenciais, as edificações apresentam trincas. Os solos colapsíveis, podem se apresentar sob a forma de coluviões fofos ou solos arenosos fofos.

“No Estado de São Paulo originam-se da laterização do arenito Bauru, rocha sedimentar que recobre os derrames basálticos da formação Serra Geral” (CESTARI JUNIOR; CELERI, 1999).

Nos locais de ocorrências de coberturas detrítico-lateríticas e de coluviões, a elevação do lençol freático poderá ocasionar fenômenos de colapso, preocupantes, principalmente, nas áreas urbanas.

b) Potencialização da Expansividade de Solos e Rochas

Solos expansivos são aqueles que apresentam expansão quando colocados em presença de água. A expansividade está intimamente ligada às características do mineral de argila presente e à sua porcentagem na constituição do solo. É agravada nos casos de umidade reduzida desses solos. Eles apresentam problemas, tanto nas fundações de edificações de pequeno porte, como de instabilidade de talude, quando há uma redução nas pressões confinantes, como no caso de cortes e exposição dos materiais ao acesso de água e agentes intempéricos.

Quando houver a presença de argilo-minerais expansivos na região do reservatório, com a saturação, poderão ocorrer fenômenos de expansão, interferindo nas fundações de construções e obras urbanas implantadas sobre essa formação. Entretanto, esse fenômeno é possível apenas em locais onde a superfície do terreno com afloramentos encontra-se em cotas próximas àquelas do reservatório, pois para a sua deflagração é fundamental o acesso de água aos minerais expansivos e o desconfinamento das camadas.

A potencialização da colapsividade e expansividade são impactos negativos, cuja probabilidade de ocorrência e alcance espacial dependem dos solos da região. Quando as condições são favoráveis, esses impactos aparecem, são permanentes, devendo ocorrer predominantemente, e com as maiores magnitudes, quando do enchimento do reservatório, podendo ser reativados quando das variações de níveis d'água durante a operação. São irreversíveis e sua magnitude e grau de relevância dependerão da probabilidade de ocorrência e da possibilidade de atingir áreas urbanas com muitas instalações e construções.

4.3.3.2 – Instabilizações e Erosões nas Encostas Marginais

a) Generalidades

O enchimento do reservatório e a operação da usina favorecem o desenvolvimento de novos processos erosivos e de instabilização das encostas ou a reativação de outros já instalados, devido ao embate de ondas, submersão parcial com elevação da superfície freática e oscilações dos níveis d'água do reservatório e dos níveis freáticos em unidades geológico-geotécnicas susceptíveis às instabilizações. Antes do enchimento do reservatório as unidades podem estar sob condições não saturadas ou, pelo menos, com nível freático mais baixo, portanto, com maior resistência às instabilizações.

A relocação de estradas, adequação de acessos, instalação de canteiro, abertura de áreas de empréstimo e as próprias escavações para a construção da barragem são outras ações que poderão deflagrar processos erosivos e de instabilização.

A estabilidade e erodibilidade das encostas marginais são influenciadas por vários fatores e principalmente por aqueles indicados a seguir:

- características das unidades geológico-geotécnicas que recobrem as rochas;
- declividades das encostas e do topo rochoso subjacente aos materiais de cobertura;
- orientação das estruturas geológicas presentes nos solos de alteração e nas rochas, em relação às encostas;
- posição do nível d'água nas diferentes unidades geológico-geotécnicas e variação desse nível d'água;
- presença ou ausência de cobertura vegetal e de suas características e
- uso e ocupação do solo de maneira geral, assinalando-se a interferência antrópica, como desmatamentos, construção de estradas ou implantação de outras obras.

Um exemplo clássico de instabilização de encostas ocorreu no vale do rio Vajont, na Itália, aos pés do Monte Toc, sul dos Alpes (PALMIER, 1987). Nesse vale foi construída a barragem de Vajont, com 261 m de altura, iniciando-se seu enchimento em 1960. Nesse ano já foram observadas movimentações do solo superficial em uma das margens da barragem. Ainda no mesmo ano ocorreu o primeiro escorregamento de um trecho da encosta do reservatório, devido à instabilidade do maciço rochoso. Em 1961 o reservatório foi parcialmente esvaziado, as margens foram instrumentadas e a seguir o enchimento foi retomado. Em abril de 1962 a água atingiu o nível de 155 m a montante da barragem, reiniciando os movimentos superficiais nas encostas, tendo sido registrados 15 abalos sísmicos entre abril e maio. Entre setembro e outubro de 1963, quando o reservatório se encontrava com 180 m de altura, foram registrados 60 abalos e fortes movimentos superficiais nas encostas, culminando, em 9 de outubro, com o deslizamento de cerca de $250 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rocha para o reservatório. Esse deslizamento provocou um abalo de grandes proporções e uma

onda gigante, que atingiu 100 m acima do NA na margem oposta do reservatório, transbordou sobre a barragem e inundou o vale a jusante, eliminando diversos povoados e matando mais de 2.000 pessoas.

Nos estudos de avaliação desse impacto deverão ser definidos os relevos, bem como as unidades geológicas que estarão em contato com a lâmina d'água do reservatório.

Devem ser observados deslizamentos e erosões instalados ao longo de estradas existentes na área, como: a ocorrência de depósitos de blocos, ravinas e sulcos de erosão em solo de alteração, escorregamentos e voçorocas.

Os processos de erosão e instabilização das encostas marginais podem ocasionar prejuízo às populações, propriedades e paisagens vizinhas, assoreamento do reservatório, aumento da turbidez e de material sólido na água no reservatório e dos rios, alteração de qualidade da água e ictiofauna, sendo, portanto, impactos negativos. É um impacto de ocorrência certa e de alcance espacial variável, pois acontecerá em locais de presença de fatores desfavoráveis. Ocorrerá de forma permanente e irreversível, apesar de que os seus efeitos são passíveis de tratamento ou mitigação. Poderão também ser evitados com a implementação de tratamentos e medidas mitigadoras prévias.

Quanto à magnitude e grau de relevância, o impacto ocorrerá em trechos de maior susceptibilidade, devido à concentração de fatores condicionantes, como declividade média a elevada das encostas, características das unidades geológicas, tipo de ocupação das áreas adjacentes, e também nos locais onde existam processos já instalados.

b) Recuos de margens de reservatório

– O processo

Dentre os mecanismos de erosão das margens de reservatórios tem-se o embate de ondas provocadas por ventos atuantes sobre a superfície líquida. A ocorrência e amplitude do recuo de margens dependerá de diversos fatores,

dentre eles: da espessura do solo de capeamento, da composição granulométrica desse solo, da energia das ondas atuantes, da forma do reservatório, da declividade das encostas, etc. (DE VINCENZO JUNIOR, 2003). Contribui para esse fenômeno a própria alteração do meio físico decorrente da ascensão do lençol freático, redução dos parâmetros de resistência dos materiais, alteração do estado de tensão em fraturas de maciços rochosos e outros.

As características topográficas do reservatório são importantes na efetividade dos ventos e ação de ondas sobre as margens. Estas características determinam a presença de barreiras físicas ou ampliam a magnitude dos corredores de aceleração das ondas e definem as orientações das margens em relação às direções dos ventos e, conseqüentemente, da onda incidente (DE JORGE, 1984 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003). Outro aspecto importante é o do alinhamento do reservatório com a direção predominante dos ventos da região, o que pode favorecer a mobilização dos fetches maiores. A cobertura de solo também é determinante no processo, pois margens com rochas aflorantes não são afetadas pelas ondas, ao menos a curto prazo.

O recuo de margem se dá pela formação de uma plataforma de erosão, com declividade variável, em geral de 2% a 10%, que pode alcançar dezenas de metros além da borda original do reservatório. Dependendo do material e do tipo do relevo no entorno do reservatório, o processo erosivo pode formar barrancos contínuos na orla do reservatório, tornando a margem vertical (cicatriz vertical).

Os sedimentos erodidos nas margens são retrabalhados pelo fluxo e refluxo das ondas, sendo que uma parte desse sedimento se deposita no pé dos barrancos de erosão, numa feição de relevo denominada “praia”, e as margens adquirem o aspecto de falésias litorâneas. Outra parte desse sedimentos é removida para o interior do reservatório, pela subida do NA ou pela ocorrência de ondas de maior amplitude.

Com o decorrer do tempo a magnitude da erosão diminui gradualmente, devido à formação das praias, que absorvem grande parte da energia das ondas, impedindo o prosseguimento da erosão da base do barranco. Na Figura 4.3.31 a seguir apresenta-se a evolução da erosão de margem de reservatórios.

Figura 4.3.31 – Processo Erosivo em Margens de Reservatórios

Fonte: FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003

Após a estabilização, o processo pode ser retomado caso haja aumento no NA do reservatório. Uma elevação da ordem de 0,5 m a 1,0 m no nível do lago é suficiente pra alterar o equilíbrio alcançado e reiniciar a erosão da base do barranco.

No caso de ocorrência do recuo com formação de barranco, sua evolução pode se dar por erosão corrosiva da frente do talude, provocando recuos paralelos e contínuos, especialmente nos barrancos baixos, ou por solapamento do pé do talude, tornando-o contra-inclinado (inclinação negativa), e causando a ruptura da porção superior por trincas de tração, conforme Figura 4.3.32 a seguir.

Figura 4.3.32 – Evolução do Processo Erosivo por Solapamento

Fonte: FERNANDEZ, 1995 DE VINCENZO JUNIOR, 2003

– Métodos para prognóstico

No caso de solos não coesivos no entorno do reservatório, STARA et al (2002) recomendam um método baseado na avaliação da estabilidade do solo, e que foi verificado em reservatório tchecos. O ponto limite da plataforma de abrasão pode ser calculado, segundo a Figura 4.3.33 a seguir, por:

$$Va = Mn_{\max} + \frac{hn}{2} + \Delta H$$

onde:

A_T = ponto limite da plataforma de abrasão;

B_T = ponto de máxima retração da margem;

$Mn_{\max}$ = NA máximo normal, m;

Va = altura da extremidade da plataforma de abrasão, m;

α' = ângulo de inclinação estável da plataforma de abrasão;

φ = ângulo de atrito interno do solo;

hn = altura da onda de projeto, m;

ΔH = altura da maré, m

Figura 4.3.33 – Esquema do Método para Determinação do Ponto Extremo da Plataforma de Erosão

Fonte: STARA et al, 2002

No caso de solos coesivos os autores apresentam uma metodologia que depende da coesão, do ângulo de atrito interno do solo e das principais solicitações. Evidentemente os métodos não consideram o efeito das raízes da vegetação existente no entorno do reservatório, que podem limitar a erosão do terreno.

– O Reservatório de Itaipu

Dentre os reservatórios brasileiros, o de Itaipu é um dos que apresenta recuos de margens consideráveis (FERNANDEZ 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003), sendo que, nos monitoramentos efetuados, foram registrados valores de recuos com taxas de até 4,8 m/ano.

O reservatório de Itaipu tem 1.460 km² de área de inundação e 29 x 10⁹ m³ de volume armazenado. As profundidades máximas e médias são de 170,0 m e 21,5 m, respectivamente. Seu enchimento se deu em 1984 e o monitoramento do recuo de margem foi feito em 1994, portanto, após 10 anos do início de sua operação.

As principais características geológico-geotécnicas do reservatório são: rocha de embasamento: basalto; relevo suave e ondulado nas bordas do reservatório; solos profundos com espessuras de até 10 m, constituídos por 90% a 97% de fração argilosa; não existem afloramentos de rocha nas margens.

Outra característica importante é que o reservatório se desenvolve na direção N-S, coincidindo com a direção predominante dos ventos na região, o que, associado ao relevo suave do entorno, que permite a livre circulação dos ventos, potencializa a formação de ondas.

Os estudos realizados visando a quantificação das erosões e regressões de margem foram desenvolvidos a partir do monitoramento de 9 pontos, 5 situados em margens brasileiras e 4 em paraguaias, conforme indicado na Figura 4.3.34 a seguir. As medições foram realizadas por 21 meses, no período de junho/1993 a março/1995 (FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003).

A estimativa da erosão ocorrida em período anterior às pesquisas (1984 a 1993) foi feita a partir de superposição de mapas, tendo sido identificadas taxas de regressão de até 5,0 m/ano. O quadro a seguir resume as informações desse período, em áreas correspondentes às Estações de Monitoramento implantadas no lado brasileiro, conforme Figura 4.3.34 a seguir.

Tabela 4.3.21 – Erosão Estimada nos Nove Primeiros Anos da Operação da UHE Itaipu

TRECHO	COMPRIMENTO DO TRECHO (m)	ÁREA DA MARGEM ERODIDA (m ²)	RECUO MÉDIO ANUAL (m/ano)	VOLUME ERODIDO (m ³)	RECUO TOTAL DE MARGEM (m)
1	597	13.300	2.8	8.585,3	25,2
2	936	23.500	3.0	20.939,4	27,0
3	432	5.800	2.5	7.520,2	22,4
4	690	27.800	5.0	38.505,0	45,0
5	681	14.700	2.8	9.416,6	25,2

Fonte: FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003

Na escolha dos 9 pontos de medição foram avaliados diferentes aspectos de margens, como: morfologia, alturas de taludes, orientação da face do barranco, tipo de vegetação, etc, de forma a não imputar-se erros sistemáticos aos resultados da pesquisa.

Figura 4.3.34 – Reservatório da UHE Itaipu – Estações de Monitoramento dos Recuos de Margens

Fonte: FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003

Na Tabela 4.3.22 a seguir tem-se os resultados do monitoramento efetuado nos 21 meses e a taxa anual de recuo calculada.

Tabela 4.3.22 – Recuo de Margem no Reservatório da UHE Itaipu

ESTAÇÃO	REGRESSÃO ACUMULADA (m)	RECUO MÉDIO ANUAL (m/ano)
1	1,08	0,62
2	1,62	0,92
3	1,17	0,67
4	6,46	3,69
5	1,85	1,06
6	4,84	2,77
7	8,41	4,80
8	2,85	1,63
9	6,26	3,58
MÉDIA	3,84	2,19

Fonte: FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003

Cabe ressaltar que os maiores recuos foram verificados nas Estações localizadas em pontas de penínsulas (Estações 4, 7 e 9), onde o fetch mobilizado é maior e a ação do vento é mais efetiva. Reforçando esta conclusão, observou-se que as estações situadas em baías ou reentrâncias apresentaram taxas erosivas menores.

Em função da heterogeneidade dos processos erosivos, bem como da diversidade da modelagem geomorfológica dos entornos do reservatório, o comportamento erosivo foi agrupado em 3 categorias: margens baixas, margens altas com erosão fraca e margens altas com erosão forte. (FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003).

- Margens baixas

Trechos constituídos por margens com cerca de 1,0 m, com referência ao nível normal do reservatório. Durante as tempestades as ondas chegam a encobrir o barranco, ampliando sua ação erosiva, inclusive em superfície.

O processo erosivo é a “corrosão” (erosão corrosiva), ou seja, remoção de grumos de solo, deixando um aspecto “esburacado” no talude. As rupturas são raras e ocorrem em pequenos blocos.

- Margens altas com erosão fraca

Trechos que se constituem por margens com alturas superiores a 1,0 m, localizadas em reentrâncias do reservatório, estando relacionadas ao maior abrigo e dissipação da energia das ondas.

Uma característica comum destas margens é a formação de praias, evitando que o nível do reservatório atinja diretamente a base dos barrancos. O principal processo erosivo é o desmoronamento de grandes massas de solo da porção superior dos taludes. Estes permanecem na mesma posição por vários meses, sendo removidos mais lentamente.

O comportamento erosivo dessas margens é de caráter sazonal, principalmente associado a períodos chuvosos, muito provavelmente pela redução de coesões aparentes, apresentando, por vezes, aspecto final conchoidal.

- Margens altas com erosões fortes

Estas margens estão localizadas nas penínsulas, onde são mais solicitadas pelo embate de ondas, resultando em um acelerado recuo da linha da margem. Podem ser identificados 3 processos de desenvolvimento de erosões (A, B e C), sendo que os taludes tipo A correspondem àqueles que apresentam elevadas densidades de raízes, que conferem considerável resistência à porção superior do talude. Aqueles classificados como B, representam taludes cujo processo de evolução de erosão depende da velocidade de remoção dos sedimentos situados junto aos pés do talude.

O comportamento típico C representa zonas de abrasão de ondas e sua altura depende da variação do nível do reservatório e magnitude das ondas. A erosão e/ou ruptura estaria mais relacionada a processos hidrodinâmicos.

O ciclo erosivo nesse tipo de margem começa pela remoção dos sedimentos de base dos barrancos, seguido pelo descalçamento (solapamento) do pé e posterior desabamento de blocos individualizados, na porção B, ou extensos, na porção A.

As erosões no reservatório de Itaipu ainda não se encontram estabilizadas, mas observa-se uma redução da velocidade de avanço, provavelmente devida à perda de capacidade erosiva das ondas, pela diminuição do colchão d'água ao longo das plataformas de erosão já existentes.

- O reservatório da UHE Jurumirim

As principais características geológico-geotécnicas desse reservatório são (DE VINCENZO JUNIOR, 2003): rocha de embasamento: basalto e arenito;

relevo ondulado, com declividades superiores a 10%, com máximas de 30%; grandes espessuras de solo coluvionar arenoso.

As margens do reservatório, constituídas por solos coluvionares arenosos, apresentam-se suscetíveis às erosões. Foram observadas erosões de margens com a formação de praias de declividades entre 5% e 10% e taludes verticais semelhantes à falésias litorâneas. Os avanços do processo ocorrem por erosão do pé do talude e posterior ruptura circular ou plana. Foram medidas praias com extensões variáveis entre 50 e 180 m, sendo que os trechos já estabilizados foram os que apresentaram o ponto mais elevado da praia, junto ao pé do talude erodido, na mesma cota do NA máximo do reservatório (DE VINCENZO JUNIOR, 2003).

– O reservatório da UHE Paraibuna

Esse reservatório também apresenta grandes instabilizações de margens, devidas ao embate de ondas em taludes íngremes (IPT, 1984 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003). Suas principais características geológico-geotécnicas são: rocha de embasamento: granito-gnaiss; relevo acidentado nas bordas do reservatório, com inclinações superiores a 30%; grandes espessuras de solo, da ordem de 12 m e 25 m, para solos residuais de migmatito e de granito, respectivamente.

Segundo os referidos autores, ao processo inicial de ataque de ondas, que descalçou os taludes em solo, somou-se a submersão parcial da encosta e a saturação dos solos adjacentes, pela elevação do lençol freático, o que alterou seus parâmetros de resistência. A submersão da porção resistente dos taludes (pé ou meia encosta) altera as tensões no maciço e a elevação do lençol pode introduzir empuxos hidrostáticos e instabilizar fraturamentos pré-existent.

O processo de erosão nesse reservatório se estabiliza apenas quando atinge maciço rochoso com menor grau de fraturamento.

– Demais reservatórios analisados

Os demais reservatórios em estudo (DE VINCENZO JUNIOR, 2003) apresentavam as seguintes características quanto ao recuo de margem:

- UHE Ilha Solteira: sem erosões, devido à baixa declividade das encostas, próximas de taludes de praia, com cobertura por solos arenosos, aspectos que permitem a dissipação da energia das ondas, sem conseqüências para as margens;
- UHE Capivara: atualmente sem erosões progressivas, devido à pequena espessura original do solo superficial e de alteração, que já foi removido, expondo a rocha e estabilizando o processo;
- UHE Porto Primavera: o reservatório se encontrava com 6 meses de idade quando se fez um levantamento topográfico, que constatou recuos de margens de até 10 m, ainda sem formação de praias. As características físicas do entorno, como taludes subverticais em arenito, taludes em solo com declividade de 100%, grandes espessuras de solos arenosos pouco argiloso, permitem supor que o processo ainda vai evoluir.

VIRGINIA CLEIRE RIBEIRO PIMENTEL

**ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

v.2

São Paulo
2004

VIRGINIA CLEIRE RIBEIRO PIMENTEL

Enga. Civil, Escola de Engenharia de São Carlos – USP – 1975

**ALTERNATIVAS DE SOLUÇÃO PARA
OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia
Hidráulica.

Orientador: PROF. DR. Giorgio
Brighetti – Professor do Departamento
de Engenharia Hidráulica e Sanitária da
EPUSP.

São Paulo
2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Pimentel, Virginia Cleire Ribeiro

Alternativas de solução para os impactos físicos de barragens / V.C.R. Pimentel. - São Paulo, 2004.

2v.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1.Reservatórios 2.Impactos ambientais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

VOLUME 1

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – GENERALIDADES.....	5
2.1 – Barragens.....	5
2.1.1 – Demanda d'Água no Mundo.....	5
2.1.2 – Demanda de Energia no Mundo.....	10
2.2 – Barragens no Século XX.....	19
2.3 – Usos Predominantes das Barragens por Região.....	23
2.3.1 – Barragens para Irrigação.....	26
2.3.2 – Barragens para Abastecimento Doméstico e Industrial.....	27
2.3.3 – Barragens para Geração de Energia.....	28
2.3.4 – Barragens para Proteção contra Enchentes.....	28
2.4 – Atributos Físicos das Grandes Barragens.....	29
2.5 – Barragens no Brasil.....	30
2.5.1 – Geração Hidrelétrica.....	30
2.5.2 – Irrigação.....	35
2.5.3 – Abastecimento de Água.....	36
2.5.4 – Controle de Cheias.....	37
2.6 – Comentários.....	37
CAPÍTULO 3 – IMPACTOS DE BARRAGENS.....	38
3.1 – Antecedentes.....	38
3.2 – Conseqüências da Construção de Barragens.....	44
3.3 – Classificação dos Impactos.....	50
3.4 – Ações Geradoras de Impactos.....	53

3.5 – Fontes Alternativas de Água e Energia.....	54
3.5.1 – Abastecimento de Água ou Irrigação por Captação do Lençol Subterrâneo	54
3.5.2 – Energia Solar	56
3.5.3 – Biomassa	56
3.5.4 – Energia Eólica	57
3.5.5 – Petróleo.....	57
3.5.6 – Carvão Mineral	58
3.5.7 – Gás Natural.....	59
3.5.8 – Energia Nuclear.....	59
3.5.9 – Energia das Águas Oceânicas	60
3.5.10 – Repotenciação das Usinas Existentes (Gestão da Oferta)	60
3.5.11 – Conservação de Energia (Gestão da Demanda)	60
3.5.12 – Comentários.....	61
CAPÍTULO 4 – IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS.....	63
4.1 – Estudos de Diagnóstico Ambiental	63
4.1.1 – Clima	63
4.1.2 – Recursos Hídricos	64
4.1.3 – Geologia.....	64
4.1.4 – Geomorfologia	65
4.1.5 – Pedologia e Aptidão Agrícola.....	65
4.1.6 – Análise Integrada	65
4.2 – Avaliação dos Impactos no Meio Físico	65
4.2.1 – Identificação dos Impactos Ambientais	66
4.2.2 – Definição dos Fatores Ambientais	66
4.2.3 – Matriz de Interferências.....	71
4.3 – Avaliação dos Impactos	73
4.3.1 – Clima	73
4.3.1.1 – Alterações na Umidade do Ar, Ventos e Nevoeiro	73
4.3.1.2 – Gases de Efeito Estufa	75
4.3.1.3 – Balanço Hídrico da Bacia Hidrográfica.....	107
4.3.1.4 – Evaporações Líquidas nos Reservatórios de UHEs	108

4.3.2 – Recursos Hídricos	113
4.3.2.1 – Intensificação de Ondulações no Espelho d'Água	113
4.3.2.2 – Variação Diária do Nível d'Água do Rio a Jusante da Barragem.....	115
4.3.2.3 – Intensificação dos Processos de Assoreamento a Montante	117
4.3.2.4 – Elevação dos Níveis das Águas Subterrâneas com o Enchimento do Reservatório.....	147
4.3.2.5 – Variações dos Níveis das Águas Subterrâneas durante a Operação	166
4.3.3 – Terrenos	166
4.3.3.1 – Potencialização da Colapsividade de Solos e Expansividade de Solos e Rochas de Fundações	168
4.3.3.2 – Instabilizações e Erosões nas Encostas Marginais	169

VOLUME 2

4.3.3.3 – Sismicidade Induzida por Reservatórios	182
4.3.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados	203
4.3.3.5 – Interferências nos Depósitos de Areia e Cascalho	207
4.3.3.6 – Interferências nos Depósitos de Argila.....	208
4.3.3.7 – Alteração da Paisagem pela Formação do Reservatório.....	209
4.3.3.8 – Degradação da Paisagem pela Operação da Usina	209
4.3.3.9 – Degradação da Paisagem pela Execução de Movimentos de Terra e Rocha	210
4.3.4 – Limnologia	210
4.3.4.1 – Generalidades	211
4.3.4.2. – Lagos e Reservatórios	216
4.3.4.3 – Eutrofização de Reservatórios	218
4.3.4.4 – Estratificação Térmica de Reservatórios	235
4.3.4.5 – Comentários.....	263
4.4 – Hierarquia dos Impactos	265

4.4.1 – Metodologia	265
4.4.2 – Impactos Destacados como os Mais Relevantes	266
4.4.3 – Impactos Destacados como Relevantes	267
CAPÍTULO 5 – POSSÍVEIS SOLUÇÕES E MEDIDAS PARA ATENUAR OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS.....	269
5.1 – Fase de Planejamento – Estudo de Alternativas Locacionais para a Barragem	269
5.2 – Possíveis Soluções e Medidas Aplicáveis.....	274
5.2.1 – Clima	274
5.2.1.1 – Monitoramento do Clima Local.....	274
5.2.1.2 – Gases de Efeito Estufa	278
5.2.2 – Recursos Hídricos	287
5.2.2.1 – Monitoramento de Níveis d’Água a Jusante e a Montante da Barragem	287
5.2.2.2 – Monitoramento Sedimentológico.....	290
5.2.2.3 – Medidas para Controle do Assoreamento em Reservatórios	292
5.2.2.4 – Medidas para Controle de Erosão a Jusante.....	295
5.2.2.5 – Monitoramento Hidrogeológico.....	295
5.2.2.6 – Medidas para o controle da elevação do lençol freático.....	303
5.2.3 –Terrenos	305
5.2.3.1 – Monitoramento e Estabilização de Encostas Marginais	305
5.2.3.2 – Medidas para Estabilização de Encostas Marginais	312
5.2.3.3 – Monitoramento Sismológico.....	316
5.2.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados	319
5.2.3.5 – Recomposição de Áreas Degradadas.....	320
5.2.4 – Limnologia	322
5.2.4.1 – Monitoramento da Qualidade da Água	322
5.2.4.2 – Medidas Aplicáveis	329

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	345
LISTA DE REFERÊNCIAS	347
GLOSSÁRIO	356
ASPECTOS LEGAIS E INSTITUCIONAIS	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Consumo Regional de Água Doce por Uso (1996)	7
Figura 2.1.2 – Demanda Média Anual de Água Doce per Capita (consumo próprio e demais usos: irrigação, industrial, doméstica e municipal).....	8
Figura 2.1.3 – Distribuição da Água no Mundo	9
Figura 2.1.4 - Países com Carência de Água.....	9
Figura 2.1.5 – PIB Mundial (em bilhões de dólares/97).....	11
Figura 2.1.6 – Crescimento do PIB por grupo (em % aa).....	11
Figura 2.1.7 – Oferta Interna de Energia (10 ⁶ tep)	12
Figura 2.1.8 – Intensidade Energética (tep/mil US\$).....	13
Figura 2.1.9 – Participação das Fontes de Energia na OIE	13
Figura 2.1.10 – Emissões de Dióxido de Carbono por Região (milhões de toneladas)...	14
Figura 2.1.11 – Demanda de Energia (milhões tep)	15
Figura 2.1.12 – Estrutura da OIE (%).....	16
Figura 2.1.13 – Oferta Interna de Energia (%).....	17
Figura 2.1.14 – OIE 2002, BRASIL	17
Figura 2.1.15 – OIE 2000, Mundo	17
Figura 2.1.16 – Consumo Final de Energia por Setor (milhões tep)	18
Figura 2.1.17 – Taxas Médias de Crescimento ao Ano (%)	18
Figura 2.2.1 – Distribuição Regional das Grandes Barragens em 2000.....	20
Figura 2.2.2 – Evolução no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX ...	21
Figura 2.2.3 – Evolução Acumulativa no Comissionamento de Grandes Barragens no Século XX.....	21
Figura 2.3.1 – Distribuição das Barragens Existentes por Uso nas Diversas Regiões ...	24
Figura 2.3.2 - Barragens de Hidrelétricas por Região	25
Figura 2.3.3 – Barragens para Irrigação por Região.....	25
Figura 2.3.4 – Barragens para Abastecimento por Região	26
Figura 2.3.5 – Barragens para Controle de Cheias por Região	26
Figura 2.3.6 – Terras Irrigadas a Partir de Barragens	27
Figura 2.4.1 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Altura	29
Figura 2.4.2 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Altura.....	29
Figura 2.4.3 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Área do Reservatório.....	30
Figura 2.4.4 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Área do Reservatório.....	30

Figura 2.4.5 – Distribuição Global das Grandes Barragens por Volume do Reservatório.....	30
Figura 2.4.6 – Distribuição Regional das Grandes Barragens por Volume do Reservatório.....	30
Figura 2.5.1 – Usinas Hidrelétricas por Classe de Potência e Bacia Hidrográfica.....	32
Figura 2.5.2 – Maiores Reservatórios Brasileiros de Hidrelétricas.....	35
Figura 3.1.1 – Significado do Impacto Ambiental.....	39
Figura 3.1.2 – Conceito de Impacto Ambiental segundo Wathern.....	40
Figura 3.2.1 - Impactos Previstos e Imprevistos no Ecossistema.....	48
Figura 3.3.1 – Seqüência das Alterações Causadas pela Construção de Barragens em Rios.....	50
Figura 4.3.1 – Esquema Simplificado do Efeito Estufa	78
Figura 4.3.2 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais comparados com cultura de arroz e aterro sanitário	86
Figura 4.3.3 – Localização dos Reservatórios Estudados.....	92
Figura 4.3.4 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Bolhas.....	93
Figura 4.3.5. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Bolhas.....	94
Figura 4.3.6 – Emissões Médias de (C-CH₄) por Difusão	94
Figura 4.3.7. – Emissões Médias de (C-CO₂) por Difusão	95
Figura 4.3.8 – Emissões de Carbono de Usinas Termoelétricas e de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas Monitoradas.....	102
Figura 4.3.9 – Emissões de Carbono de Usinas Termoelétricas e de Reservatórios de Usinas Hidrelétricas Monitoradas.....	103
Figura 4.3.10 – Emissões de CH₄ e CO₂ da UHE Tucuruí e de Térmica equivalente à óleo combustível.....	105
Figura 4.3.11 – Permanência do CH₄ e do CO₂ ao longo do tempo.....	105
Figura 4.3.12 – Forçamento Radiativo do CH₄ (E₄) e do CO₂ (E₂).....	105
Figura 4.3.13 – Relação $R = E_4/E_2$	106
Figura 4.3.14 – Balanço Hídrico e Evaporação Líquida em Lajeado.....	109
Figura 4.3.15 – Modificação no Regime de Escoamento Anual devido à Barragem de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry, Estados Unidos.	116
Figura 4.3.16 – Flutuação Diária da Vazão Efluente devido à Operação de Hidrelétrica no rio Colorado, em Lee's Ferry , Estados Unidos	116
Figura 4.3.17 – Bacia do Rio São Francisco – Linhas de Produção de Sedimentos.....	122
Figura 4.3.18 – Zoneamento Hidrossedimentológico Prévio do Brasil	124
Figura 4.3.19 – Efeitos de uma Barragem sobre o Transporte de Sedimentos	131
Figura 4.3.20 – Curvas de Eficiência de Retenção de Sedimentos em Reservatórios, Segundo Brune.	136

Figura 4.3.21 – Relacionamento entre os Fatores que Contribuem para o Equilíbrio Estável num Rio.....	141
Figura 4.3.22 – Camada de Armadura	142
Figura 4.3.23 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Hoover, no rio Colorado	144
Figura 4.3.24 – Alteração na Granulometria Média do Material do Leito a Jusante da Barragem Parker, no rio Colorado	144
Figura 4.3.25 – Alteração da Cota de Fundo do rio Ratmau a Jusante do Vertedouro do Canal Ganga	146
Figura 4.3.26 – Degradação a Jusante da Barragem Vlotzlavski, rio Visla, após 4 anos do Fechamento da Barragem	147
Figura 4.3.27 – Modelo Esquemático da Evolução do Processo de Elevações Induzidas no Lençol Freático nas Bordas de Reservatório.....	148
Figura 4.3.28 – Mapa de Situação da Cidade de Pereira Barreto, em Relação aos Reservatórios existentes na Região.....	156
Figura 4.3.29 – Variação da Espessura da Lâmina d'Água ao longo do rio após o Barramento, segundo Seção Longitudinal à Borda do Reservatório	159
Figura 4.3.30 – Curvas de Distribuição da Elevação do Nível d'Água Subterrânea nas Vizinhanças de um Reservatório	162
Figura 4.3.31 – Processo Erosivo em Margens de Reservatórios.....	173
Figura 4.3.32 – Evolução do Processo Erosivo por Solapamento	174
Figura 4.3.33 – RESquema do Método para a Deter,minação do Ponto Extremo da Plataforma	175
Figura 4.3.34 - Reservatório da UHE Itaipu - Estações de Monitoramento dos Recuos de Margens	177
Figura 4.3.35 – Reservatório sobre um Lençol Freático Rebaixado	187
Figura 4.3.36 – Mapa do Histórico de Sismicidade na Região dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki.	193
Figura 4.3.37 – Registro do Número de Eventos Antes e Após o Enchimento dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki	194
Figura 4.3.38 – Histograma de Terremotos e Enchimento do Reservatório de Almendra	198
Figura 4.3.39 – Sismicidade Local e Enchimento do Reservatório de Almendra	199
Figura 4.3.40 – Salinização por Irrigação.....	205
Figura 4.3.41 – Porcentagem do Total de Terras Irrigadas Afetada por Sal	206
Figura 4.3.42 – Compartimentos de um Ecossistema Lacustre	216
Figura 4.3.43 – O Processo de Eutrofização	219
Figura 4.3.44 – Eutrofização Acelerada.....	221
Figura 4.3.45 – Conseqüências da Eutrofização no Sistema	222

Figura 4.3.46 – Eutrofização em Reservatórios Tropicais	229
Figura 4.3.47 – Perfil Vertical de Algumas Variáveis nos Reservatórios do Médio Tietê em 1998.....	232
Figura 4.3.48 – Razão de Redução de Variáveis Químicas dos Reservatórios, com Relação aos Valores Medidos no Rio Tietê.....	233
Figura 4.3.49 – Curva de Decaimento Exponencial da Luz Solar (A) e Perfil Vertical de Temperatura do Lago (B).....	237
Figura 4.3.50 – Perfil Vertical de Temperatura de Um Lago Estratificado	238
Figura 4.3.51 – Variação da Densidade da Água com a Temperatura	239
Figura 4.3.52 – Sequência de Perfis de Temperatura Observados Durante Um Ano, Num Lago de Região Temperada no Hemisfério Norte.....	240
Figura 4.3.53 – Variação do Regime de Mistura com a Localização do Lago.....	242
Figura 4.3.54 – Processo de Produção e Consumo de Oxigênio Num Lago Estratificado	245
Figura 4.3.55 – Exemplo de Perfis Verticais de Concentração de Oxigênio ao Longo do Tempo	245
Figura 4.3.56 – Representação Esquemática dos Principais Processos Atuantes em Reservatórios.....	248
Figura 4.3.57 – Principais Trocas Energéticas através da Interface Ar-Água.....	249
Figura 4.3.58 – Correntes de Densidade Advindas da Vazão Afluente.....	252
Figura 4.3.59 - Zonas de Influência da Vazão de Saída.....	253
Figura 4.3.60 – Distribuição de Velocidades para Reservatórios Não Estratificados (A) e Estratificados (B)	254
Figura 4.3.61 – Linhas de Fluxo na Saída do Reservatório.....	255
Figura 4.3.62 – Estratificação Térmica Vertical no Reservatório de Tucuruí	259
Figura 4.3.63 – Concentração de OD no Reservatório de Tucuruí	259
Figura 4.3.64 – Variação na Vazão Efluente do Reservatório de Tucuruí	260
Figura 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”	203
Figura 5.1.2 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”	204
Figura 5.2.1 – Perfil Esquemático para Instalação dos Monitores.....	299
Figura 5.2.2 – Implantação de Pinos e Estacas.....	310
Figura 5.2.3 – Substituição do Solo Fofa por Solo Compactado.....	312
Figura 5.2.4 – Construção de Brocas sob a Viga Baldrame	313
Figura 5.2.5 – Tratamento de Ruptura de Solos Expansíveis	313
Figura 5.2.6 – Contenção por Rip-rap	315
Figura 5.2.7 – Contenção por Gabiões Caixa	316
Figura 5.2.8 – Salinização por Irrigação e Formas de Controle	319

Figura 5.2.9 – Retirada Seletiva de Massas d'Água.....	332
Figura 5.2.10 – Aeração do Hipolímnio	333
Figura 5.2.11 – Aeração de Lagos Rasos por Meio de Mangueiras.....	334
Figura 5.2.12 – Remoção de Sedimentos por Sucção.....	334
Figura 5.2.13 – Oxidação Química dos Sedimentos	335
Figura 5.2.14 – Utilização de Peixes (Carpa Ou Tilápia) para Controle das Macrófitas.....	336
Figura 5.2.15 – Tomada d'Água com Comporta Adaptável ao NA	338
Figura 5.2.16 – Tomada d'Água com Viga Anti-vórtice.....	339
Figura 5.2.17 – Evolução da Camada Anóxica.....	341
Figura 5.2.18 – Evolução dos Teores de OD no Trecho a Jusante de Tucuruí.....	342

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Investimentos Anuais em Barragens na Década de 90.....	23
Tabela 2.3.1 – Características Gerais de Reservatórios de acordo com seu Uso Principal.....	24
Tabela 2.5.1 – Distribuição das UHEs Brasileiras por Faixa de Potência (jan/2002)	31
Tabela 2.5.2 – Maiores UHEs em Operação no Brasil em Jan/2002	33
Tabela 2.5.3 – Maiores Reservatórios de UHEs Brasileiras.....	34
Tabela 2.5.4 – Reservatórios para Irrigação	36
Tabela 2.5.5 – Reservatórios para Abastecimento de Água	36
Tabela 2.5.6 – Reservatórios para Controle de Cheias e Regularização.....	37
Tabela 3.1.1 – Características dos impactos ambientais	40
Tabela 3.1.2 – Atividades Modificadoras do Meio Ambiente sujeitas à Avaliação de Impacto Ambiental	41
Tabela 3.1.3 – Síntese e comparação de métodos de Avaliação de Impacto Ambiental	43
Tabela 4.2.1 – Exemplo de Matriz de Interferência.....	72
Tabela 4.3.1 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Clima.....	74
Tabela 4.3.2 – Índices de Concentração de Gases de Efeito Estufa.....	82
Tabela 4.3.3 – Emissão de Gases de Efeito Estufa de Habitats Naturais e Outros	86
Tabela 4.3.4 – Características Físicas dos Reservatórios Tropicais que influenciam na Emissão de Gases de Efeito Estufa.....	88
Tabela 4.3.5 – Sinopse das Características dos Reservatórios Hidrelétricos Estudados	91
Tabela 4.3.6 – Médias de Emissões das Campanhas.....	93
Tabela 4.3.7 – Hidrelétricas mais Poluentes	97
Tabela 4.3.8 – Eficiência das Hidrelétricas em Comparação com Termelétricas Virtuais de Potência Equivalente.....	99
Tabela 4.3.9 – Produção de Carbono Estimada Durante a Vida Útil dos Reservatórios	100
Tabela 4.3.10 – Evaporação Líquida para Usinas em Operação Segundo a Normal Climatológica 61-90	110
Tabela 4.3.11 – Evaporação Líquida para Usinas que Entrarão em Operação até 2005, segundo a Normal Climatológica 61-90	112
Tabela 4.3.12 – Evaporação Líquida para Usinas em Processo de Licitação, segundo a Normal Climatológica 61-90	112
Tabela 4.3.13 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Recursos Hídricos	114

Tabela 4.3.14 – Produção de Sedimentos em Suspensão dos Maiores Rios do Mundo	120
Tabela 4.3.15 – Regionalização Hidrossedimentológica Prévia do Brasil.....	125
Tabela 4.3.16 – Classificação das Zonas Hidrossedimentológicas pela sua Predisposição Presente (1988) aos Riscos Sedimentológicos.....	126
Tabela 4.3.17 – Guia para Correção da Descarga do Leito e para Orientação do Método de Obtenção dessa Descarga.	134
Tabela 4.3.18 – Peso Específico Aparente Estimado.....	137
Tabela 4.3.19 – Matriz para Determinação da Distribuição da Variação de Cargas Hidráulicas (Δh) no Aquífero Livre na Margem de Reservatório.....	160
Tabela 4.3.20 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Terrenos.....	167
Tabela 4.3.21 – Erosão Estimada nos Nove Primeiros Anos da Operação da UHE Itaipu	176
Tabela 4.3.22 – Recuo de Margem no Reservatório da UHE Itaipu	177
Tabela 4.3.23 – Atividade Sísmica Induzida por Reservatórios	191
Tabela 4.3.24 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Limnologia....	212
Tabela 4.3.25 – Principais Características Limnológicas dos Reservatórios que alteram a Qualidade do Rio a Jusante	213
Tabela 4.3.26 – Efeitos na Qualidade da Água a Jusante.....	214
Tabela 4.3.27 – Comparação das Características de Lagos e Reservatórios	218
Tabela 4.3.28 – Ocorrência de Estratificação Térmica em Reservatórios Brasileiros	243
Tabela 4.3.29 – Parâmetros Limnológicos no Reservatório de Tucuruí.....	260
Tabela 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”.....	273
Tabela 5.2.1 – Medidas Preventivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório	293
Tabela 5.2.2 – Medidas Corretivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório	294
Tabela 5.2.3 – Controle de Erosão no Canal de Jusante de Barragem – Medidas Preventivas e Corretivas.....	295
Tabela 5.2.4 – Problemas de Qualidade da Água no Lago Paranoá	343

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE = Associação Brasileira de Geologia de Engenharia

ABRH = Associação Brasileira de Recursos Hídricos

ADA = Área Diretamente Afetada

AHE = Aproveitamento Hidrelétrico

AI (AII) = Área de Influência (ou Área de Influência Indireta)

AIA = Avaliação de Impacto Ambiental

ANA = Agência Nacional de Águas

ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica

BCOLD = Brazilian Committee on Large Dams

BID = Banco Interamericano de Desenvolvimento

CBDB = Comitê Brasileiro de Barragens

CEI = Comunidade dos Estados Independentes (antiga URSS, União das Repúblicas Socialistas Soviéticas)

CEMIG = Companhia Energética de Minas Gerais

CEPIS = Centro Paramericano de Ingenieria Sanitária y Ciencias del Ambiente

CESP = Companhia Energética de São Paulo

CHESF = Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CODEVASF = Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco

CONAMA = Conselho Nacional de Meio Ambiente

DAEE = Departamento de Águas e Energia Elétrica

DBO = Demanda Bioquímica de Oxigênio

DEA = Disponibilidade Específica de Água

DNAEE = Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DNOCS = Departamento Nacional de Obras contra as Secas

EIA = Estudos de Impacto Ambiental

ELETROBRÁS = Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

ELETRONORTE = Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

EPA = Environmental Protection Agency

EPUSP = Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ETP = Evapotranspiração Potencial

ETR = Evapotranspiração Real

EUA = Estados Unidos da América do Norte

FCTH = Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

FEEMA/RJ = Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente / Rio de Janeiro

FNDCT = Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FURNAS = Furnas Centrais Elétricas S.A.

GWP = Global Warming Potencial

IBAMA = Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICOLD = International Commission on Large Dams

INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

IPH = Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

JCA = Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico

LI = Licença de Instalação

LO = Licença de Operação

LP = Licença Prévia

MAB = Movimento dos Atingidos por Barragens

N = norte (Ponto Cardeal)

NA = nível d'água

NEPA = National Environmental Policy Act

OCDE = Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (integrada por América do Norte, Europa Ocidental, Oceania, México, Turquia e Japão)

OD = oxigênio dissolvido

OIE = Oferta Interna de Energia

OMM = Organização Meteorológica Mundial

ONS = Operador Nacional do Sistema Elétrico

ONU = Organização das Nações Unidas

PBA = Projeto Básico Ambiental

pH = potencial hidrogeniônico

PIB = Produto Interno Bruto

RIMA = Relatório de Impactos no Meio Ambiente

RMSP = Região Metropolitana de São Paulo

S = sul (ponto cardinal)

SERLA/RJ = Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas / Rio de Janeiro

SP = Sondagem a Percussão

SUREHMA = Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Paraná

UHE = Usina Hidrelétrica

UNESCO = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

URSS = União das Repúblicas Socialistas Soviéticas

UTE = Usina Termelétrica

UV = radiação ultravioleta invisível proveniente do sol

UVA = radiação ultravioleta de longo comprimento de onda

UVB = radiação ultravioleta de pequeno comprimento de onda

UVC = radiação ultravioleta absorvida pela camada de ozônio

W = oeste (ponto cardinal)

WDC = The World Commission on Dams

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDA

aa = ao ano

Ar = argônio

C = carbono

Ca²⁺ = cálcio

CFC_s = clorofluorcarbonos

CH₄ = metano

CO = monóxido de carbono

CO₂ = dióxido de carbono ou gás carbônico

DIN = nitrogênio dissolvido

DIP = fósforo dissolvido

Fe³⁺ = ferro

g = grama

GW = gigawatt (10⁹ W)

ha = hectare

H₂S = gás sulfídrico

(H₂O)_g = vapor d'água

K⁺ = potássio

kg = quilograma

kW = kilowatt (10³ W)

l = litros

m = metro

m² = metro quadrado

m³ = metro cúbico

mg = miligrama

Mg²⁺ = magnésio

MW = megawatt (10⁶ W)

NO₃⁻ = nitrato

NO₂⁻ = nitrito ou dióxido de nitrogênio

NH₄⁺ = amônia

Na⁺ = sódio

N₂ = nitrogênio

N₂O = óxido nitroso

NO_x = óxidos de nitrogênio

O₂ = oxigênio

O₃ = ozônio

°C = graus centígrados

PO₄³⁻ = fosfato

P = fósforo

SO₂ = dióxido de enxofre

t = tonelada

tep = tonelada equivalente de petróleo

TN = nitrogênio total

TP = fósforo total

TW = terawatt (10^{12} W)

W = watt

4.3.3.3 – Sismicidade Induzida por Reservatórios

a) Generalidades

Tremores de terra causam medo e horror no homem, cujo órgão de equilíbrio no labirinto permite sentir acelerações da ordem de 2 a 3 cm/s^2 (HABERHLENER, 1979). “Sismo é uma oscilação ou vibração da superfície da Terra, causada por uma perturbação transitória do equilíbrio elástico das rochas na superfície terrestre ou debaixo da mesma. O sismo pode ser natural ou artificial. Natural se é causado por um ajuste espontâneo de esforços no interior da Terra, e artificial se esta perturbação é causada pelo homem. O sismo natural, pela sua origem, pode ser tectônico, vulcânico ou de colapso. Um sismo resultante da deformação repentina da crosta terrestre por falhamento é chamado de sismo tectônico. Este tipo de sismo é o mais comum e causa os maiores e mais difundidos prejuízos.” (SHAYANI, 1979).

O desenvolvimento das teorias da deriva dos continentes e das placas, seus limites e cinemática, permitiu o entendimento de diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre, como os sismos. É nas bordas das placas que se concentram as deformações, metamorfismos, magmatismos e deslocamentos, traduzidos por faixas orogênicas, vulcânicas e sísmicas (HASUI, 1979). A geometria das placas maiores (África, Eurásia, Norte-Americana, Sul-Americana, Pacífico, Índia-Austrália, Antártida, Nazca, Cocos e Caribe) e seus movimentos hoje estão razoavelmente estabelecidos. As velocidades de deslocamento das placas chegam a alcançar até 6 cm/ano (HASUI, 1979).

As cartas de sismicidade natural mostram que os epicentros dos tremores de terra se distribuem ao longo de faixas mais ou menos estreitas, coincidindo com a borda do Pacífico, a cadeia Alpes-Himalaia e as cadeias médio-oceânicas. Essas faixas coincidem com as bordas das placas litosféricas.

O interior das placas, por outro lado, não é assísmico. A maior parte das áreas continentais se situa no interior das placas, como o Brasil, que se situa na região ocidental da Placa Sul-Americana, em cuja parte oeste se dá a subducção

(mergulho) da Placa de Nazca e se eleva a cadeia Andina. Em algumas regiões intraplacas a atividade sísmica é alta, como no Japão, Califórnia e norte da Itália; em outras, é moderada, como no leste dos Estados Unidos e no vale do Reno. O Brasil, por outro lado, tem baixa atividade sísmica (MENDIGUREN, 1979).

A atividade sísmica natural no Brasil tem registro desde 1560 em São Paulo, seguida por uma ocorrência registrada em junho de 1690 na margem esquerda do rio Amazonas, até um tremor que sacudiu Cuiabá em 28/10/1746, com intensidade entre IV e V pela escala de Mercalli modificada, que coincidiu com o terremoto que destruiu Lima, no Peru. Segundo HABERHLENER (1979), que registrou 251 sismos naturais ocorridos no Brasil entre 1560 e 1977, a região mais suscetível a esses fenômenos é a região Norte (41 % do total), sendo que o Acre detém o recorde de número de tremores (23 % do total). Além disso, de um total de 42 tremores com magnitude maior que 5,2 registrados em todo o Brasil, 30 (ou 71 % do total) aconteceram na região Norte, sendo 24 (57 % do total) no Acre.

O fenômeno sísmico no estado do Acre se explica pela posição geográfica que ocupa, na zona subandina, afetada pela instabilidade tectônica da grande cordilheira.

As escalas usualmente empregadas para avaliar terremotos são: a de Intensidade, que mede os danos provocados, sendo a de Mercalli Modificada a mais comum, com valores variáveis entre I e VII, e a de Magnitude, mais conhecida como Escala Richter, com unidade em graus ou M. A escala Richter mede a severidade dos terremotos através de uma escala logarítmica arbitrária que define a magnitude em termos da máxima amplitude registrada por um sismógrafo padrão, a uma distância de 100 km do epicentro. Um evento com grau de magnitude maior ou igual a 8 é um terremoto capaz de causar catástrofes de grandes proporções. Os maiores tremores da história, que causaram danos mais severos, tiveram magnitudes entre 7 e 8,6, esse último ocorrido no Alasca em março de 1964 (PALMIER, 1987).

b) Antecedentes

A associação dos sismos à construção de barragens e enchimento dos reservatórios começou a ser aventada em 1970, quando a UNESCO criou o Grupo de Trabalho dos Fenômenos Sísmicos Associados aos Grandes Reservatórios, que concluiu, ao final da primeira reunião em dezembro daquele ano, que os reservatórios podem provocar sismos, independente da sismicidade da região, mas desde que as condições geotécnicas e hidrogeológicas do local favoreçam seu aparecimento (PALMIER, 1987). Segundo SHAYANI (1979), LANE (1971) foi o autor das primeiras publicações sobre o assunto, tendo observado que:

- a atividade sísmica resulta do enchimento do reservatório e não da construção da barragem;
- num local onde já existia atividade sísmica, o número de tremores a sua magnitude aumenta com o aumento do NA;
- a atividade não se relaciona diretamente com o peso d'água armazenada, já que alguns grandes reservatórios não mostraram evidências de movimentos sísmicos;
- o nível de atividade sísmica de reservatórios em diferentes sítios não está diretamente relacionado com sua profundidade;
- a atividade sísmica pode ser iniciada quase simultaneamente com o enchimento do reservatório, porém o período de máxima atividade, em certos casos, mostra um apreciável retardamento em relação ao final do enchimento.

Com relação ao tempo para o início dos tremores, observou-se que podem ocorrer em várias ocasiões, inclusive após o esvaziamento e reenchimento do reservatório.

O primeiro caso bem documentado de sismos induzidos (SHAYANI, 1979 apud FRANÇA, 1978) ocorreu no reservatório da Barragem de Hoover, no rio

Colorado, USA, pouco tempo depois do seu enchimento, em 1936. Dessa data até o início da década de 60, vários fenômenos semelhantes foram observados próximos a reservatórios ao redor do mundo, sem que resultasse qualquer dano de monta. Durante a década de 60, quatro terremotos de magnitude maior que 6 foram registrados junto a reservatórios recém criados: Hsinfengkiang (China, 1962, magnitude 6,1), Kariba (fronteira Rodésia/Zâmbia, 1963, magnitude 6,1), Kremasta (Grécia, 1966, magnitude 6,3) e Koyna (Índia, 1967, magnitude 6,5).

Esses sismos causaram perdas humanas e materiais na área dos reservatórios e danos às próprias barragens no caso de Koyna e Hsinfengkiang, que, apesar de não serem catastróficos, despertaram a atenção de sismólogos e engenheiros projetistas de barragens.

c) O processo de Ocorrência de Sismos Induzidos

Um sismo ocorre mediante um deslizamento ou fraturamento na crosta terrestre, em função de um acréscimo de tensão ou de um decréscimo de resistência. O aumento de tensão pode ser devido a diversos fatores, como forças tectônicas, expansão da rocha, cargas produzidas pelas marés e carregamentos e descarregamentos artificiais, devidos à mineração, construção de túneis e enchimento de reservatórios. O decréscimo de resistência da rocha é devido à mudança nas tensões efetivas, intemperismos ou alteração geológica do material.

“A ruptura por cisalhamento do maciço rochoso ocorre quando sua resistência ao cisalhamento é atingida, estando diretamente relacionada com a razão: tensão de cisalhamento/tensão normal efetiva, no plano de ruptura do maciço. No caso de um acréscimo de pressão neutra, a tensão de cisalhamento não se altera, porém a tensão normal efetiva sofre um decréscimo equivalente, criando-se, portanto, a possibilidade de ocorrência de ruptura num maciço rochoso. Este mecanismo tem sido considerado, pelos estudiosos do assunto, como um dos principais fatores de indução de abalos sísmicos pelo enchimento de reservatórios”(SHAYANI, 1979).

Além do acréscimo na pressão neutra, outros mecanismos têm sido apontados como indutores de sismos, tais como: energia potencial armazenada pela

depressão elástica da crosta, em pontos onde as tensões já são consideráveis, reajustamento das camadas do subsolo devido à sobrecarga do reservatório, etc. No entanto, há um consenso de que os sismos induzidos ocorreram em maciços rochosos que já se encontravam com tensões próximas às de ruptura, mesmo antes do enchimento dos reservatórios, visto que as tensões causadas pelo enchimento foram pequenas quando comparadas com as tensões liberadas pelos sismos.

O que se tem de concreto é que um grande reservatório pode alterar o nível de atividade sísmica de uma área e que alguns sismos catastróficos ocorreram em áreas consideradas assísmicas antes do enchimento do reservatório. Os principais mecanismos de indução de sismos por reservatórios são:

- Pressões Intersticiais

Um caso típico de aumento das pressões pode ser observado na Figura 4.3.35 a seguir, que mostra uma situação em que o lençol freático original se encontrava muito profundo. Quando o reservatório atingiu a zona de falha permeável, o aumento da pressão da água foi mais elevado que a profundidade do lago, levando a um estado de tensões mais crítico que o normal. Pode-se acrescentar um outro aspecto, que é o possível enfraquecimento do material, que se encontrava seco antes do enchimento do lago.

Figura 4.3.35 – Reservatório sobre um Lençol Freático Rebaixado

Fonte: SHAYANI, 1979

Em várias barragens, onde falhas existentes foram cobertas pelo reservatório (SHAYANI, 1979), ocorreu um acentuado acréscimo das pressões neutras, sem que fosse constatada atividade sísmica, caso do lago Powell, EUA.

O que se pode concluir, portanto, é que as mudanças de pressão neutra exercem influência decisiva na indução de terremotos pouco profundos, sendo mais difícil a extensão do mecanismo para o caso dos terremotos mais profundos. Além disso, os esforços cisalhantes originais devem estar próximos ao limite de ruptura do maciço, para que o acréscimo de pressão neutra ocasione um sismo.

– Sobrecarga de Água.

O lago Kariba, cuja barragem tem 128 m de altura, foi objeto, em 1970, de estudo teórico completo sobre sismicidade induzida, referendado a seguir por medições em campo (SHAYANI, 1979). Concluiu-se que o acréscimo máximo de tensões cisalhantes sob o lago foi de aproximadamente 2 kg/cm^2 , o que é bem pouco comparado com as tensões existentes em rochas à profundidade de alguns quilômetros. Logo, para que um sismo resulte da sobrecarga da água do reservatório, é necessário que as tensões presentes no subsolo se encontrem no limite.

– Alteração das Propriedades Físico-Químicas das Rochas

Além do aumento da pressão neutra sob o reservatório, devido à presença de água em regiões mais profundas do maciço, e aumento do estado de fissuramento, devido à sobrecarga de água, podem ocorrer processos químicos que enfraquecem o material, como a hidratação de moléculas de silicone-oxigênio, ocasionando fadiga estática. Esse fenômeno é chamado de corrosão por tensão e provoca a formação de novas fissuras na rocha e, portanto, penetração ainda mais profunda da água. Isso parece ter ocorrido no reservatório de Hsinfengkian, na China, onde a circulação de água em canais profundos provocou a argilização do material presente nos planos menos resistentes.

– Outros Mecanismos de Indução

A alteração das propriedades mecânicas do meio, provocada pelo reservatório, que torna o meio mais heterogêneo e, portanto, menos capaz de suportar cargas, é um possível mecanismo de indução de sismos. Também deve ser considerado o mecanismo pouco conhecido de dilatação de maciços rochosos, como fonte potencial de terremotos.

d) Principais Associações entre Sismicidade e Reservatórios

Segundo KNUEPFER et al, 1979, a associação mais forte entre um reservatório e a sismicidade induzida é inferida onde a atividade sísmica local aumenta e diminui em associação direta com as mudanças no NA do reservatório. Uma associação forte também é inferida quando o enchimento é acompanhado, ou rapidamente seguido, por um acréscimo na atividade sísmica da área, principalmente se a área era previamente considerada de baixa sismicidade. Por outro lado, quando a sismicidade ocorre algum tempo depois do enchimento, mas não exibe relação clara com as flutuações do NA, ou quando a associação espacial da atividade sísmica com o reservatório é ambígua, a associação é considerada fraca.

De uma análise estatística de 234 reservatórios profundos e/ou muito grandes com respeito à sismicidade induzida (KNUEPFER; PACKER; WITHERS, 1979), concluiu-se que, dos cinco parâmetros analisados, a profundidade máxima e o volume reservado são os mais fortemente relacionados à sismicidade. Os demais parâmetros analisados, como regime de tensão regional, atividade das falhas e tipo de geologia, não permitiram estabelecer correlações com a ocorrência de sismicidade. Da análise concluiu-se, além disso, que o início dos eventos de sismicidade se dá, em geral, no primeiro ano a partir do início do enchimento do reservatório.

De acordo com os modelos teóricos, a ocorrência de sismicidade induzida é fortemente correlacionada com o nível de tensão e de pressão intersticial no reservatório. Sabe-se também que o acréscimo de tensão ou de pressão intersticial provocado pelo reservatório é insuficiente para iniciar novas fraturas, mas pode deflagrar o alívio de tensões ao longo de falhas e fraturas já pré tensionadas. Portanto, a formação de reservatórios pode alterar a ocasião em que ocorreria o alívio dessas tensões.

Além disso, o foco dos sismos induzidos geralmente se situa a baixas profundidades (menos que 5 ou 10 km) e ocorre sob ou muito próximo à área inundada. Então, embora os maiores tremores induzidos provavelmente não excedam à máxima magnitude reconhecida em estudos geológicos detalhados, podem exceder o tremor de projeto em áreas de baixa sismicidade natural.

Outro estudo sobre sismicidade induzida (PACKER et al, 1979) faz uma associação entre “falhas ativas” em dez reservatórios que registraram a ocorrência de sismos de magnitude maior que 5. Uma vez que os carregamentos decorrentes do enchimento dos reservatórios não são suficientes para iniciar novas fraturas, e que o represamento pode deflagrar o alívio de tensões normais ao longo de falhas pré tensionadas, os deslocamentos resultantes dos eventos de sismicidade induzida por reservatórios devem ter ocorrido como resultado das tensões criadas por regime de tensões tectônicas ativas. Visto que, segundo esse autor, os tremores induzidos por reservatórios são rasos, com hipocentro não mais profundo que 10 a 15 km, tremores de magnitudes moderadas ao longo

dessas falhas ativas pré tensionadas podem ser o resultado da ruptura da falha, que se propagou até a superfície.

Segundo a definição mais difundida atualmente, “falha ativa” é a que teve um deslocamento relativo no regime de tensões tectônicas atual e que, portanto, seria mais suscetível a tremores após o enchimento do reservatório. Para o “Bureau of Reclamation”, uma falha é considerada ativa caso tenha se movimentado durante os últimos 100.000 anos; para o “Corps of Engineers”, esse período é de 35.000 anos; para o Estado da Califórnia é de 10.000 anos e para a “U. S. Nuclear Regulatory Commission”, de 500.000 anos (COSTA, 1979).

Alguns dos dez reservatórios selecionados por Packer foram investigados no campo e outros foram analisados com base em dados disponíveis. Packer conclui que oito deles apresentam evidências de falhas ativas nas proximidades e os outros dois provavelmente também as tem, apesar de não terem sido comprovadas no seu estudo. A seguir são apresentados cinco dos reservatórios estudados (PACKER et al, 1979): Koyna, Kremasta/Kastraki, Eucumbene, Benmore e Mead (Hoover Dam).

e) Casos de Atividade Sísmica Induzida por Reservatórios

Os casos mais importantes de sismos decorrentes do enchimento de reservatórios constam da Tabela 4.3.23 a seguir.

Segundo os critérios de correlação apresentados no item 4.6.4, diversos pesquisadores analisaram os casos mais importantes de atividade sísmica associada a reservatórios, sendo que alguns deles são apresentados a seguir.

– Reservatório da Barragem de Koyna

A barragem de Koyna, situada no oeste da Índia, represa o rio Koyna, formando um lago de 100 m de profundidade, o lago Shivaj Sagar. A região apresenta os principais sistemas de falhas geológicas na borda do platô onde se localiza a barragem, mas registrava um número pequeno de tremores antes do enchimento

do reservatório. O maior tremor havia ocorrido em 1764, 55 km ao norte de Koyna, com magnitude de 5,5 (PACKER et al, 1979).

Tabela 4.3.23 – Atividade Sísmica Induzida por Reservatórios

BARRAGEM	PAÍS	ALTURA (m)	VOLUME (Mm³)	ANO DE REPRESAMENTO	ANO DO MAIOR SISMO	MAGNITUDE MÁXIMA	SISMICIDADE DA REGIÃO
Koyna	Índia	103	2.780	1962	1967	6.5	Baixa
Kremasta	Grécia	160	4.750	1965	1966	6.3	Alta
Hsinfengkiang	China	105	11.500	1959	1962	6.1	Média
Kariba	Rodésia	128	160.000	1959	1963	6.1	Baixa
Porto Colômbia	Brasil	40	1.460	1973	1974	5.1	Baixa
Hoover	U.S.A.	221	38.296	1935	1939	5.0	Média
Marathon	Grécia	63	41	1930	1938	5.0	Alta
Benmore	N. Zelândia	110	2.200	1964	1966	4.9	Média
Monteynard	França	155	240	1962	1963	4.5	Baixa
Cajuru	Brasil	23	192	1959	1972	4.7	Baixa
Kurabe	Japão	186	199	1960	1961	4.9	Alta
Bajina-Basta	Iugoslávia	89	340	1965	1967	4.5 – 5.0	Média
Nurek	Rússia	310	73.300	1972	1972	4.5	Alta
Mangla	Paquistão	115	6.358	1967	1970	4.2	Alta
Talbingo	Austrália	162	921	1671	1972	3.5	Baixa
Keban	Turquia	207	31.000	1973	1974	3.5	Alta
Paraibuna/ Paraitinga	Brasil	104	4.740	1976	1977	3.2	Baixa
Grandval	França	88	292	1959	1963	V*	Baixa
Piave de Cadore	Itália	112	68	1949	1950	3.8	Alta
Canelles	Espanha	150	678	1960	1962	V*	Baixa

* Escala de Intensidade – Mercalli Modificada

Fonte: SHAYANI, 1979

Em 1964 o reservatório, cujo início de enchimento se deu em 1962, alcançou o volume de 2.000 Mm³. Havia ocorrido alguns tremores em 1963, mas até agosto de 1967 a atividade sísmica foi mínima. Porém, em setembro de 1967, cerca de 5 anos após o enchimento do reservatório, ocorreram dois fortes tremores, sendo que o primeiro deles provocou a morte de 177 pessoas e o ferimento de outras 2.300, destruindo grande parte da Vila de Koyna Naga (ROTHÉ, 1970 apud PALMIER, 1987).

Seguiram-se grandes tremores perto da barragem, um deles com magnitude de 5,4 em 1967, sendo que o evento de 10 de dezembro de 1967 registrou a magnitude local 6,5, um recorde mundial entre os sismos induzidos por reservatórios e também entre os eventos sísmicos históricos do oeste da Índia.

Após esse acontecimento, vários pesquisadores correram ao local, para investigar as fissuras no solo e outras consequências geológicas associadas ao terremoto. As fraturas e fissuras no solo eram os aspectos de maior interesse, pois representavam a possível superfície de ruptura durante o terremoto, ao longo de uma zona de falha existente, além de permitir avaliar se a falha era ativa antes de 1967.

As fraturas ocorreram cerca de 4 km a sudeste da barragem e se estenderam por 7 a 8 km. A conclusão do estudo (PACKER et al, 1979) foi que a ruptura do solo ocorreu ao longo de uma falha ativa, que apresentara deslocamentos anteriores.

– Reservatórios de Kremasta e Kastraki.

Os reservatórios de Kremasta, com cerca de 120 m de profundidade, e o de Kastraki, situado 20 km a jusante do anterior e com 86 m de profundidade, localizam-se no sul da Grécia, no rio Acheloos. O enchimento de Kremasta começou em 21 de julho de 1965 e o de Kastraki em janeiro de 1969. O registro da macro-sismicidade da área entre os anos de 1912 e 1975 indicou que ocorria uma atividade moderada antes do enchimento do primeiro reservatório, que aumentou sensivelmente após o enchimento (KNUEPFER et al., 1979; PACKER et al, 1979). Na Figura 4.3.36 apresenta-se o mapa de sismicidade histórica da área dos reservatórios

Antes do enchimento, o epicentro dos sismos se localizava fora da área do reservatório. Apesar do monitoramento deficiente antes de 1965, um tremor de magnitude maior que 4,5 havia sido registrado. Em agosto de 1965 uma nova estação sismográfica foi instalada a 115 km de Kremasta e registrou um aumento do número de sismos nas proximidades do reservatório. De uma média de 2 eventos por mês passou para quase 80 eventos em janeiro e fevereiro de 1966, a maioria deles com epicentro sob o reservatório, culminando com um terremoto de magnitude 6,3 em 5 de fevereiro de 1966, praticamente na mesma ocasião em que o reservatório atingiu seu NA

máximo (Figura 4.3.37). Esse terremoto destruiu 480 casas, matou uma pessoa e feriu outras 60.

Figura 4.3.36 – Mapa do Histórico de Sismicidade na Região dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki.

Fonte: PACKER et al, 1979

A sismicidade decresceu no ano seguinte, estabilizando, contudo, numa taxa de número de eventos bem mais alta que antes do enchimento do reservatório, conforme Figura 4.3.37 apresentada a seguir.

Figura 4.3.37 – Registro do Número de Eventos Antes e Após o Enchimento dos Reservatórios de Kremasta e Kastraki

Fonte: KNUPFER et al, 1979

Como principais feições geológicas na área do reservatório de Kremasta tem-se três falhas que passam pelo lago e outra que se situa a nordeste, nas suas proximidades. Todas essas falhas aparentemente são ativas (PACKER et al, 1979).

– Reservatórios Eucumbene, Talbingo e Blowering

Esse reservatórios são os maiores do Sistema Snowy Mountain, um complexo para hidreletricidade e irrigação localizado no sudeste da Austrália (PACKER et al, 1979). Os lagos foram formados pelo barramento dos rios Snowy e Eucumbene. Antes da instalação da rede de sismógrafos do Sistema, em 1958, tremores de magnitude inferior a 4 raramente eram detectados na região. Portanto, não se dispunha de uma base de dados prévia satisfatória. Contudo, um grande banco de dados sísmicos foi acumulado a partir do barramento do rio Eucumbene, iniciado em junho de 1957. Quarenta e quatro tremores de magnitude suficiente para ser precisamente posicionados ocorreram durante o período de três anos e meio, de 1958 a 1962, numa região situada ao sul do reservatório. O maior desses eventos, que ocorreu em maio de 1958, teve magnitude 5.

O lago Talbingo teve seu enchimento iniciado em 01 de maio de 1971, tendo sido monitorado desde dois anos antes (1969). Treze anos antes da data de início do enchimento, o monitoramento global da área era efetuado pela rede sismográfica de Eucumbene, tendo sido registrado um único evento, pequeno, ao norte da barragem. A atividade sísmica aumentou a partir de 19 de maio de 1971, com três pequenos tremores em maio, 39 em junho (o maior com magnitude 2,4) e 20 por mês em julho e agosto. A taxa de enchimento do reservatório foi reduzida sensivelmente após agosto, sendo acompanhada pela redução no número de tremores, mas os microtremores permaneceram constantes.

Nesses três reservatórios foram identificadas falhas ativas nas imediações, que podem ter favorecido a ocorrência dos tremores.

– Reservatório Benmore

O reservatório foi formado pelo barramento do rio Waitaki e é o maior lago artificial da Nova Zelândia. Localiza-se na porção central da Ilha Sul, em área de baixa sismicidade, sendo que antes da barragem (1955 a 1964) foram registrados apenas 7 tremores num raio de 80 km, com magnitude máxima 4,4.

Após o enchimento do reservatório (1965 a 1972), 29 tremores ocorreram no mesmo raio de 80 km da barragem Benmore, sendo que dois deles tiveram magnitude de 5. Contudo, o enchimento do reservatório, em dezembro de 1964, não foi imediatamente seguido pelo aumento na atividade sísmica. O primeiro sismo de magnitude 5 ocorreu em julho de 1966 e o segundo em abril de 1971, quase 5 anos depois. Além disso, os eventos não parecem estar correlacionados com mudanças no NA do reservatório, já que o NA foi mantido praticamente constante desde o enchimento.

Os autores do estudo (PACKER et al, 1979) concluíram que o aumento significativo da atividade sísmica na região após o enchimento do reservatório Benmore se deveu à uma zona de falha denominada Ostler, considerada ativa, em cujo alinhamento e proximidades se concentrou grande número dos eventos registrados.

– Barragem Hoover e Lago Mead

O lago Mead foi formado pela construção da barragem Hoover no rio Colorado, divisa dos estados de Arizona e Nevada, nos EUA. É um dos maiores e mais profundos reservatórios a que se atribui a responsabilidade por induzir ou deflagrar um aumento nos níveis de sismicidade local. A profundidade máxima do reservatório é de 166 m (PACKER et al, 1979).

A região era considerada de baixa sismicidade antes do enchimento do reservatório, entre 1935 e 1938. A atividade sísmica se iniciou após o fechamento da barragem e ficou concentrada numa faixa de 25 km de largura. Durante o período de monitoramento de 8 anos, que se iniciou em 1937, os

epicentros se localizaram principalmente ao longo de falhas existentes, com profundidade dos focos inferior a 9 km. Os maiores tremores, com magnitude 5, ocorreram em 1939, 1942, 1948, 1952 e 1958.

Na fase inicial, entre os anos de 1938 e 1948/1949, os estudos dos tremores mostraram uma correlação entre as variações sazonais do NA do reservatório e a frequência da atividade sísmica. Contudo, a atividade sísmica no período subsequente, de 1949 a 1976, não mostrou correlação com um acréscimo de 20 % na carga do reservatório. Análises dos dados da área durante os anos de 1972 e 1973 mostraram que a atividade sísmica do reservatório não diferia daquela do seu entorno. Uma das explicações para o fenômeno é que a sismicidade pós enchimento podia ser o resultado das tensões geradas pelo peso do lago, que provocou tremores ao longo das falhas pré existentes. A base para essa explicação é que a bacia na qual o lago foi formado assentou 18 a 20 cm e que o intervalo de tempo entre o reservatório alcançar o NA máximo (1938) e o maior evento registrado (o primeiro em 1939) foi relativamente curto.

Os estudos efetuados (PACKER et al, 1979) levaram à conclusão que existem três sistemas de falhas ativas sob ou nas imediações do reservatório, que certamente contribuíram para a ocorrência dos eventos registrados na região.

– Almendra

O reservatório de Almendra (ou Tormes) localiza-se no oeste da Espanha, próximo à divisa com Portugal, em uma área caracterizada por baixa sismicidade (KNUEPFER et al, 1979). O enchimento do lago foi iniciado em meados de 1970, atingindo o NA máximo no início de 1973. A atividade macro-sísmica mostrou-se não afetada pela formação do lago. No entanto, a atividade micro-sísmica indicou uma forte correlação entre o NA no reservatório e os micro-tremores, aumentando ou diminuindo como consequência das variações do NA do reservatório. Nas Figuras 4.3.38 e 4.3.39 são apresentados os histogramas dos macro tremores e da sismicidade local em Almendra.

OBS.:

- 1- Número de tremores num raio de até 97,5 km do centro do reservatório
 - 2- Número de tremores num raio entre 97,5 e 32,5 km do centro do reservatório
 - 3- Número de tremores num raio de até 32,5 km do centro do reservatório
- NA real
- - - NA estimado

Figura 4.3.38 – Histograma de Terremotos e Enchimento do Reservatório de Almendra
 Fonte: KNUEPFER et al, 1979

Figura 4.3.39 – Sismicidade Local e Enchimento do Reservatório de Almendra

Fonte: KNUEPFER et al, 1979

– Reservatório Sefid Rud

Esse reservatório localiza-se no norte do Irã, numa região com atividade macro-sísmica moderada. Tremores destrutivos ocorreram em 1119, 1167, 1639 e 1808 na região. O reservatório foi criado a partir de 1962 e não se registraram alterações significativas na atividade macro-sísmica após seu enchimento. Em 1968, seis anos após o início do enchimento, um tremor de magnitude 4,7 foi registrado perto do reservatório, com hipocentro a 36 km de profundidade. Mas não se conseguiu estabelecer uma clara correlação entre o evento e a flutuação do NA no reservatório (KNUEPFER et al, 1979).

Os principais casos de sismicidade induzida registrados no Brasil foram os de Orós (Ceará) e Carmo do Cajurú, sendo que no primeiro não houve registro. Os casos que foram melhor instrumentados (SHAYANI, 1979) são:

– Reservatório Carmo do Cajurú

Situa-se no rio Pará, próximo à cidade de Carmo do Cajurú, em Minas Gerais. A barragem tem 23 m de altura e o reservatório armazena 190 milhões de m³ de água. Concluído em 1959, teve registro de atividade sísmica a partir de abril de 1970, com sismo de maior magnitude 4,7 ocorrido em janeiro de 1972.

Um estudo mais detalhado desse reservatório, efetuado pela UnB - Universidade de Brasília a partir da instalação de cinco sismógrafos na região em 1975, permitiu observar que os epicentros estavam localizados, em sua grande maioria, fora da área coberta pelas águas e os hipocentros ocorriam a profundidades inferiores a 1.500 m (MENDIGUREN, 1979). Esse aspecto e mais a defasagem entre o enchimento do reservatório e o início da atividade sísmica, de mais de 10 anos, foram explicadas da seguinte maneira: o enchimento do reservatório estabilizou falhamentos de empurrão existentes na área submersa do reservatório; nas margens as conseqüências foram diferentes, sendo que o aumento do NA provocou o aumento da pressão intersticial nas falhas existentes, que, por sua vez, provocou os tremores. A defasagem entre o enchimento e os sismos foi creditada à lentidão do processo de infiltração, que obedece à lei de Darcy, já que, pelas características de permeabilidade dos solos da região, poderiam ser necessários 20 anos para que a pressão neutra atingisse 40% do valor final a uma distância de 1 km do eixo do reservatório.

Portanto, nem o modo de enchimento do reservatório nem os NA operacionais adotados teriam alterado a atividade sísmica na região, bem como um eventual esvaziamento do reservatório não traria uma diminuição imediata dos sismos.

– Reservatório de Capivari-Cachoeira

Esse reservatório se localiza no rio Capivari, próximo a Curitiba, no Paraná, tem um volume de 180 milhões de m³ e é formado por uma barragem com

61 m de altura. Foi concluído em 1970 e registrou atividade sísmica a partir de março de 1971, com três eventos de intensidade V na escala de Mercalli Modificada.

– Reservatórios de Porto Colômbia e Volta Grande

Esses reservatórios localizam-se no rio Grande, divisa de São Paulo e Minas Gerais, próximos à Conceição das Alagoas. A barragem de Porto Colômbia tem 40 m de altura e seu reservatório tem 1.460 milhões de m³ de volume, enquanto que a barragem de Volta Grande tem 56 m de altura e o reservatório 2.300 milhões de m³ de volume. As obras foram concluídas em 1972 e 1973, respectivamente, com início do enchimento do reservatório de Porto Colômbia em 1973.

Historicamente, a região é caracterizada por atividade sísmica extremamente baixa. A partir de novembro de 1973, no entanto, ocorreram manifestações de atividades sísmicas, sendo que o maior evento, de magnitude 5,1, foi registrado em fevereiro de 1974, quando Porto Colômbia já estava cheio e Volta Grande estava enchendo. A seguir o nível de atividade sísmica na região voltou aos patamares anteriores à construção das barragens.

– Reservatório de Capivara

Localiza-se no rio Paranapanema, próximo à Porecatu, na divisa de São Paulo com Paraná. Tem barragem com 61 m de altura e reservatório com 10.500 milhões de m³. Seu enchimento foi iniciado em janeiro de 1976 e em abril de 1976 começaram atividades sísmicas na região, sendo o maior tremor registrado em março de 1979, com magnitude local 4.

– Reservatório de Marimbondo

Localizado no rio Grande, divisa de São Paulo com Minas Gerais, com barragem de 106 m de altura e volume de 6.150 milhões de m³, teve geração comercial iniciada em outubro de 1975, com ocorrência de eventos sísmicos também em 1975, porém sem registro de magnitude.

– Reservatório de Paraibuna-Paraitinga

As barragens dos rios Paraibuna e Paraitinga, próximas à cidade de Paraibuna, em São Paulo, têm alturas de 98 e 104 m, respectivamente, e volume do reservatório único de 4.740 milhões de m³. O enchimento do reservatório foi iniciado em maio de 1976 e concluído em abril de 1978 e as atividades sísmicas ocorreram a partir do final de 1976, com os maiores sismos registrados em novembro de 1977 (magnitude $\geq 3,2$).

Na pesquisa efetuada pela UnB entre fevereiro e junho de 1979 foram registrados epicentros sob o reservatório, com hipocentros a menos de 1.000 m de profundidade. Os sismos foram associados ao fraturamento predominante na região, de direção NS (MENDIGUREN, 1979).

Por outro lado, vários outros grandes reservatórios foram formados no Brasil sem nenhum registro de sismicidade, como Ilha Solteira, Jupia, Água Vermelha, São Simão, Promissão, Salto Osório e Sobradinho, sendo que São Simão foi o primeiro reservatório brasileiro instrumentado antes do enchimento.

f) Comentários

A atividade sísmica natural, conforme apresentado, deve ser entendida como o resultado de uma liberação repentina de energia na crosta terrestre. O mecanismo mais comum pelo qual são produzidos sismos é a ruptura do tipo rígido de maciços rochosos, promovida pela concentração de grandes tensões em alguns locais e por movimentos da litosfera. Quando a concentração de tensões ultrapassa a resistência ao cisalhamento, a rocha sofre ruptura, preferencialmente nas partes mais fracas das áreas tensionadas, como em falhas pré-existentes.

Em vários reservatórios de usinas hidrelétricas, no Brasil e no exterior, o enchimento provoca a ocorrência dos chamados sismos induzidos. Nesses casos, o enchimento do reservatório aumenta as pressões neutras em zonas de grandes tensões pré-existentes no maciço rochoso, diminuindo sua resistência e

provocando a ruptura. Em geral, no Brasil, tais sismos têm baixa intensidade e ocorrem, com maior frequência, logo após o enchimento do reservatório.

Existe um consenso geral de que, na maioria dos casos de sismos induzidos por reservatórios, os maciços rochosos já se encontram com tensões próximas às de ruptura, antes do enchimento, pois as tensões provocadas pelo enchimento mostram-se pequenas quando comparadas às tensões liberadas pelos sismos naturais.

Os eventos sísmicos são episódicos e de difícil previsão, tanto em relação à ocorrência do fenômeno em si, como ao local que será afetado. Apesar de um sismo ter efeito bastante localizado, dificilmente afetando áreas com poucas centenas de km², seu alcance espacial pode ser considerado disperso, já que é difícil prever o local da ocorrência.

A duração dos eventos sísmicos é muito curta, da ordem de segundos, sendo que eventuais impactos irão se processar de modo praticamente instantâneo. O fenômeno é de natureza irreversível, e a magnitude e relevância dos eventuais impactos decorrentes dependerão das intensidades e magnitudes associadas aos sismos naturais e induzidos, no Brasil em geral muito baixas.

4.3.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados

a) Pelo Reservatório

O potencial agrícola de um terreno depende de uma série de fatores fixos ou variáveis, como as características físicas do solo, a disponibilidade hídrica, a fertilidade natural, os impedimentos à mecanização, as técnicas de manejo e o sistema de produção, além de fatores essencialmente econômicos, como níveis de demanda e preços dos produtos agropecuários a nível nacional e internacional, incentivos governamentais à produção, etc.

Desta forma a análise do potencial agrícola reflete não só as características edáficas dos terrenos em análise, mas também as condições econômicas de exploração.

Um reservatório inutiliza, para a agricultura, além da área a ser inundada, as áreas de empréstimo, acampamento, canteiro, etc. A maior parte destes terrenos pertence à planície fluvial do rio barrado, em geral composta por terrenos rebaixados, em cotas pouco superiores à do nível normal do rio, que são inundados periodicamente durante os períodos de cheias normais, ou então são atingidos, nas condições naturais, apenas nas cheias excepcionais.

O potencial agrícola dos solos deve ser avaliado quanto à fertilidade natural e grau de acidez, necessidade de emprego de corretivo e fertilizantes para viabilizar seu uso agrícola comercial. Deve ser avaliado o principal uso do solo na região, se para pecuária ou agricultura.

Este impacto deve ser classificado como negativo, pois, às vezes, são inundadas as melhores terras dos municípios atingidos. A ocorrência do impacto é certa e localizada na área a ser inundada pelo reservatório, a duração permanente e irreversível, pois permanece enquanto durar o empreendimento. A magnitude depende da extensão de solos atingidos e de suas características para uso agrícola. A relevância também depende do solo, se tem possibilidade de sustentação de agricultura de subsistência e demais usos.

b) Salinização

Este impacto não é associado diretamente à barragem ou ao reservatório, mas à elevação do lençol freático ou ao mau uso da água armazenada para irrigação de terras agriculturáveis.

A salinização é uma forma de poluição do solo, que ocorre em solos naturalmente suscetíveis, seja pela natureza do material de origem, seja pela maior aridez do clima ou pelas condições do relevo local (BRAGA et al, 2002). A salinização também pode ser causada pelo homem, quando utiliza a irrigação na exploração agrícola.

A consequência imediata da irrigação é uma elevação do lençol freático. Quando ele é pouco profundo, pode se formar uma franja capilar até a superfície,

acumulando sais. A evaporação que se segue deixa os resíduos salinos na camada superficial.

Em regiões de maior pluviosidade, a solução aquosa do solo apresenta menor teor de sais, as precipitações freqüentes lixiviam esse sal, devolvendo-o ao lençol freático, por infiltração. Em zonas áridas, que em geral necessitam de irrigação, o teor de sais na solução aquosa é mais elevado e a freqüência das lixiviações pelas chuvas é menor. Na Figura 4.3.40 a seguir apresenta-se um esquema do processo de salinização.

Figura 4.3.40 – Salinização por Irrigação

Fonte: BRAGA et al, 2002

Práticas de irrigação errôneas afetaram mais de 1/5 das áreas irrigadas nas regiões áridas e semi-áridas, trazendo, como resultado, a salinização e alagamento do solo, que inviabilizam a agricultura ou limitam a produção e os tipos de cultura que podem se adaptar àquelas condições.

A salinização reduz o rendimento da colheita que não tolera altos níveis de salinidade, ao ponto de, eventualmente, tornar a terra improdutiva. Na Índia, as colheitas de arroz e trigo em terras afetadas por sal foram cerca de metade daquelas de terras não afetadas.

A base de dados do WCD indica que os problemas de alagamento e salinização de sistemas de irrigação atingiram sérios níveis no mundo e têm impactos severos, duráveis e, freqüentemente, permanentes, na terra, agricultura e subsistência. Na lista pesquisada, cerca de 1/5 dos projetos de grandes barragens com um componente de irrigação mencionou impactos devido à salinização.

Dados dos 11 maiores países que utilizam irrigação mostrou que cerca de 20% das terras irrigadas são afetadas pela salinização, mas a variação na proporção de terras afetadas em cada país é alta, desde 15% na China, a 33% no Egito e 80% no Turcomenistão, conforme Figura 4.3.41 a seguir.

Figura 4.3.41 – Porcentagem do Total de Terras Irrigadas Afetada por Sal

Fonte: WCD, 2000

Os fenômenos de alagamento e salinização não são novos, mas, em geral, o problema não é detectado previamente, comprometendo grandes programas de irrigação e extensas áreas de solos agriculturáveis, como já ocorreu na Califórnia e mais recentemente no semi-árido brasileiro.

No caso da barragem de Gran Coule, uma elevação inesperada do nível do lençol freático foi identificada no começo dos anos 50, exigindo gastos adicionais consideráveis em drenagem para controlar os NA elevados. Até agora, 7.300 ha foram colocados fora de produção através de um programa governamental de patrocínio. Na Bacia do Indus, 38% do sistema de irrigação é classificado como alagado e a produção é estimada como 25% menor que a potencial, como resultado da salinização. Justificando um projeto maior de drenagem no Paquistão, o Banco Mundial atribuiu um declínio na produção de cerca de 25% à salinização e alagamento, atingindo 40 a 60% em alguns casos.

Embora a necessidade de drenagem em áreas suscetíveis à salinização seja evidente há tempos, freqüentemente tem sido omitida dos projetos. A drenagem é

realizada apenas após algum tempo, isto é, quando o NA do lençol se elevou até próximo da superfície. A não consideração da drenagem nos projetos originais pode levar à superestimativa dos benefícios líquidos do projeto. Resolver os problemas de salinização implica em aumento nos custos ou perda de produtividade ao longo do tempo.

Uma dificuldade adicional é que a previsão pode subestimar o tempo necessário para o problema aparecer. Por exemplo, no projeto Chashma, no Paquistão, houve uma mudança para culturas com maior demanda de água, como arroz e cana de açúcar, e irrigação excessiva nos primeiros estágios do desenvolvimento do projeto, quando a água era abundante. Como consequência, o NA subiu mais rapidamente que o esperado, levando à necessidade de investir nos trabalhos de drenagem em época anterior à prevista.

4.3.3.5 – Interferências nos Depósitos de Areia e Cascalho

Os depósitos de areia e cascalho que possam existir na Área Diretamente Afetada estão, em geral, associados aos aluviões recentes e terraços do rio, estando alguns deles, portanto, sujeitos às cheias anuais e/ou episódicas, independentemente da formação do lago. Esses eventos, embora frequentes e recorrentes, têm período de duração relativamente curto, e dificultam ou impedem a atividade minerária apenas durante sua permanência.

Com o enchimento do reservatório, algumas jazidas podem ser impactadas negativamente, de forma definitiva, enquanto outras, situadas na borda do reservatório ou em locais de águas pouco profundas, podem ter sua exploração continuada com os mesmos equipamentos ou através de métodos adequados à nova situação.

Assim, algumas cascalheiras ou portos de areia podem ter suas atividades interrompidas com a formação do lago, pois a altura da coluna de água tornará inviável a sua exploração, mesmo por dragagem. Ou, então, a baixa espessura da lâmina-d'água permitirá a continuidade das atividades com uma simples adaptação dos equipamentos. Por exemplo, se existirem reservas exploradas por meio de pá-

carregadeira e trator na área inundada, deverá ser verificada a possibilidade de escavação sub-aquática. As dragas mais modernas permitem dragagem a mais de 15 m de profundidade, restando então uma análise econômica da atividade.

Alguns depósitos, mesmo estando fora da área inundada pelo reservatório, poderão ser afetados pelo alteamento do lençol freático.

Avaliando-se esse impacto conclui-se, portanto, que o mesmo tem ocorrência certa e terá efeitos adversos, sendo sua natureza negativa. Seu alcance espacial é localizado e a duração é permanente para os depósitos afetados, mas pode ser compensado com medidas mitigadoras. A magnitude do impacto dependerá do número de unidades produtoras e do potencial minerário da região. Além das adaptações nos equipamentos de lavra, poderão ser estudadas relocações da atividade para depósitos fora da área diretamente afetada como medida mitigadora dos impactos.

4.3.3.6 – Interferências nos Depósitos de Argila

Os barreiros porventura existentes na Área Diretamente Afetada podem ser do tipo de depósito característico de planícies de inundação, nas margens do rio, com exploração feita por escavadeiras, acima do nível do lençol freático.

Nesse caso, pode-se esperar que os barreiros fiquem inviabilizados pelo enchimento do lago, pois a natureza do material não permite a sua lavra abaixo do NA.

O impacto sobre os barreiros terá, portanto, ocorrência certa e irreversível, com efeitos adversos, de natureza negativa. Seu alcance espacial é localizado e a magnitude e a relevância desse impacto dependerão da quantidade de barreiros afetados e de sua eventual exploração comercial, já que pode prejudicar o mercado local produtor e consumidor de tijolos e telhas, caso não sejam tomadas as medidas mitigadoras adequadas.

A relocação de barreiros ou a estocagem de material para seu aproveitamento futuro, como medidas mitigadoras de impacto, podem se mostrar viáveis, devendo ser objeto de programa específico. Essa alternativa pode ser ainda mais interessante,

caso os barreiros impactados tenham suas próprias olarias instaladas fora da área diretamente afetada.

4.3.3.7 – Alteração da Paisagem pela Formação do Reservatório

Em geral as barragens são implantadas em trechos de rios que apresentam corredeiras e cachoeiras. As praias naturais, que se formam nas épocas de vazante, em geral são muito utilizadas pela população local e por turistas, e as vezes contam com uma grande infra-estrutura de lazer.

O enchimento do reservatório altera radicalmente esta paisagem, transformando o rio em lago, e acarretando a necessidade de criação de alternativas de lazer para a população que utiliza as praias. Poderão ser construídas praias artificiais em alguns locais na borda do lago.

A alteração da paisagem com a formação do reservatório é considerada um impacto de grande magnitude, pois o rio será transformado em lago, representando uma alteração completa da paisagem. A relevância pode ser classificada como média, pois o lago também representa um recurso cênico.

4.3.3.8 – Degradação da Paisagem pela Operação da Usina

Caso as regras de operação do empreendimento prevejam a depleção do nível do lago nos períodos secos, formar-se-ão grande áreas emersas na borda do lago e algumas ilhas. O aspecto paisagístico será degradado, pois as áreas emersas estarão cobertas de lodo e serão formadas lagoas com águas pouco profundas.

O impacto do deplecionamento do reservatório será maximizado, caso se tenha áreas urbanas na borda do lago, ainda mais se houver, no contexto da paisagem, uma grande interrelação área urbana - lago, nos aspectos visual e de uso do solo.

O rebaixamento de nível d'água criará uma grande faixa de terra coberta de lodo, afastando o espelho d'água da área urbana e criando um ambiente inóspito e inadequado na zona lindeira ao lago.

A saúde pública poderá ser afetada, tendo em vista que, nos períodos de deplecionamento, serão formadas, na borda do lago, poças d'água e pequenas lagoas de água estagnada.

A alteração da paisagem pela operação do reservatório será considerada um impacto de grande magnitude e alta relevância, caso haja a possibilidade de deplecionamento do reservatório, principalmente se ele se situar próximo à áreas urbanas.

4.3.3.9 – Degradação da Paisagem pela Execução de Movimentos de Terra e Rocha

A execução dos movimentos de terra necessários para implantação do canteiro, adequação das vias de acesso, exploração das áreas de empréstimo e execução das obras, resultando na remoção da cobertura vegetal e exposição do terreno aos processos erosivos superficiais, representa um fato gerador de degradação da paisagem, inerente à execução de obras civis.

O planejamento das obras deverá prever um sistema de proteção superficial adequado, complementado pela execução de sistema de drenagem para as águas pluviais e para os taludes de cortes e aterros.

As áreas de empréstimo e bota-foras estarão localizadas, preferencialmente, abaixo da cota de inundação, o que minimiza o problema. No caso de exploração de áreas de empréstimo fora da área a ser inundada, deverão ser adotadas medidas de recuperação ambiental.

Este impacto pode ser classificado como de pequena magnitude e baixa relevância, pois trata-se de um impacto reversível e temporário, restrito à duração das obras, passível de reversão através de medidas de recuperação ambiental, e com alcance espacial localizado nas áreas de empréstimo e bota-fora, estradas de acesso e canteiro de obras.

4.3.4 – Limnologia

São aqui apresentados os impactos referentes ao Fator Ambiental Limnologia, cuja síntese encontra-se na Tabela 4.3.24.

4.3.4.1 – Generalidades

A criação de um reservatório afeta o ecossistema aquático de forma profunda e complexa. A inundação anula a produção terrestre na área submersa, iniciando-se a produção aquática, portanto mudam os agentes produtores. A energia solar que era captada pelas árvores e pela vegetação terrestre, passa a ser captada pelas plantas aquáticas com raízes e pelo fitoplâncton (algas).

O enchimento do reservatório faz desaparecer os ambientes terrestre e fluvial (lótico), dando lugar a um ambiente lacustrino (lêntico). A inundação das margens do rio, que eram ocupadas por outros ecossistemas, afeta os nutrientes, o plâncton, a flora e fauna aquáticas, incluindo peixes e vetores de doenças trazidas pela água. Ocorre uma transferência gradual do domínio das comunidades e espécies de água corrente para aquelas de águas mais lentas.

Logo após a inundação da vegetação e componentes de solo orgânico, ocorre uma súbita elevação da quantidade de nutrientes na água. Esse processo é oxidativo, provocando o aumento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), crescimento do fitoplâncton e de outras formas de produção primária, aumentando a energia transferida através das cadeias alimentares. O crescimento descontrolado das plantas aquáticas, além de provocar o aumento da taxa de transpiração, pode perturbar a navegação e a recreação no lago, causar danos às máquinas, reduzir o volume útil do reservatório, obstruir grades e filtros e criar locais propícios à procriação de vetores de doenças de veiculação hídrica, como moluscos e mosquitos. Além disso, a decomposição dessas plantas produz odores desagradáveis e compromete a produção de peixes, pois reduz o oxigênio e a incidência de luz no lago.

Com o tempo o processo se estabiliza e as modificações passam a ser mais lentas. A menos que o reservatório receba um aporte extra de nutrientes, quando, então, poderá retornar a um estado de Eutrofização.

Tabela 4.3.24 – Quadro de Avaliação de Impactos – Fator Ambiental: Limnologia

AÇÕES¹	IMPACTOS	ATRIBUTOS					MAGNITUDE			GRAU DE RELEVÂNCIA	INSERÇÃO TERRITORIAL	MEDIDAS MITIGADORAS
		POSIT. NEGAT.	PROB. DE OCOR.	ALCANCE ESPAC.	DURAÇÃO	REVERS.	QUALIFICAÇÃO		QUALIFICAÇÃO			
							ABSOLUTA	RELATIVA (%)				
7 e 14	ALTERAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS A MONTANTE DA BARRAGEM PARTICULARMENTE NOS SEGMENTOS LATERAIS (BRAÇOS) DO RESERVATÓRIO	N	C	L	P	I			G	A	ADA	DESMATAMENTO E LIMPEZA DA ÁREA DE INUNDAÇÃO; MONITORAMENTO ACOPLADO ÀS REGRAS OPERATIVAS
2, 3, 4, 5,	ALTERAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS A JUSANTE DA BARRAGEM	N	C	D	P	I			M	M	JUSANTE	REGRAS OPERATIVAS ADEQUADAS

(1) - Ações: 1 - Aquisição de Áreas; 2 - Adequação de acessos e instalação de Canteiro e acampamento; 3 - Operação do canteiro e do acampamento; 4 - Abertura de áreas de empréstimo; 5 - Desvio do rio; 6 - Construção da barragem de concreto; 7 - Enchimento do reservatório; 8 - Conclusão das obras; 9 - Operação da barragem e da usina.

OBS.: Impacto : N - Negativo, P - Positivo;
 Probabilidade de Ocorrência : C - Certa, A - Alta, B - Baixa;
 Alcance Espacial : D - Disperso, L - Localizado;
 Duração : P - Permanente; T - Temporária;
 Reversidade : R - Reversível, I - Irreversível;
 Magnitude : P - Pequena, M - Média, G - Grande;
 Grau de Relevância : A - Alta, M - Média, B - Baix

Fonte: THEMAG, 1996

O ecossistema aquático de jusante também é afetado, uma vez que os nutrientes que afluíam livremente pelo rio agora ficam detidos na barragem, provocando alterações na flora e na fauna. A principal consequência e os impactos mais relevantes a jusante da barragem estão associados à regularização das vazões e à eliminação total ou parcial das cheias. A eliminação de zonas sujeitas a inundações prejudica o ciclo natural de reabastecimento de nutrientes e pode comprometer a reprodução de algumas espécies de peixes. Nas Tabelas 4.3.25 e 4.3.26 a seguir estão apresentadas as principais características limnológicas de reservatórios que afetam a qualidade da água a jusante e quais são esses efeitos.

Outro aspecto a ser considerado na operação de reservatórios é a Estratificação Térmica vertical, que pode ocorrer em determinadas épocas do ano. A diferença de temperatura entre as camadas superficial e profunda do reservatório e, conseqüentemente, a diferença de densidade entre essas camadas, pode causar alguns inconvenientes. Um deles é o comprometimento da qualidade da água do reservatório, sendo que as camadas mais profundas passam a apresentar baixa concentração de oxigênio, alto teor de gás sulfídrico, baixo pH e altas concentrações de matéria orgânica, fosfatos, ferro e manganês.

Tabela 4.3.25 – Principais Características Limnológicas dos Reservatórios que alteram a Qualidade do Rio a Jusante

CARACTERÍSTICAS LIMNOLÓGICAS	EFEITOS SOBRE O RIO A JUSANTE
Hidrologia	Efeitos maiores em regiões semi áridas Efeitos consideráveis em regiões temperadas Efeitos menores nos trópicos
Ordem dos caudais	Inversamente proporcional aos caudais – maiores efeitos para as menores vazões
Profundidade dos reservatórios	Nenhum ou pequeno efeito em rasos, efeitos crescentes com a profundidade dos reservatórios
Profundidade da saída do reservatório	Nenhum efeito em reservatórios rasos, não estratificados; efeitos crescentes com a profundidade da saída em reservatórios estratificados
Tempo de Retenção	Reservatórios com pequeno tempo de retenção afetam pouco o rio a jusante, mas os efeitos aumentam com esse tempo
Estado Trófico	Efeitos crescentes a jusante com o aumento da produtividade biológica do reservatório

Fonte: STRASKRABA, 1993

Tabela 4.3.26 – Efeitos na Qualidade da Água a Jusante

VARIÁVEIS	ALTERAÇÕES NA QUALIDADE DA ÁGUA A JUSANTE
Variáveis Físicas	
Hidrologia	Decréscimo na taxa de escoamento quando o uso da água do reservatório é alto, como em reservatórios para irrigação, ou quando a taxa de evaporação é alta. Aumentos periódicos, aumento na variabilidade e interrupção dos ciclos naturais.
Térmicas	Decréscimo na temperatura. A magnitude do decréscimo é função do tempo de retenção, da profundidade e da posição geográfica do reservatório.
Transporte de Sedimentos	Decréscimo da carga de sedimentos
Detritos	Composição das partículas muda de abióticas para bióticas, e o tamanho das partículas decresce.
Luz	Aumenta a penetração da luz
Variáveis Químicas	
Oxigênio	Onde o reservatório é eutrófico e a profundidade da saída é abaixo do termoclina, a concentração do OD na vazão efluente pode chegar próxima de zero
H ₂ S e CO ₂	Valores crescentes, especialmente em reservatórios eutróficos, estratificados e com longos tempos de retenção
pH	Decresce
Nitrogênio	Nitrogênio gasoso aumenta nos reservatórios aerados
Matéria Orgânica	A matéria orgânica decresce a jusante quando não existe fonte de matéria no lago. A menos que ocorra uma superprodução fitoplancônica decorrente de um estado altamente eutrófico no reservatório
Fósforo	Decréscimo na concentração de fósforo, proporcional ao tempo de retenção e à trofia. Exceção para os casos em que a água é liberada do hipolímnio anóxico dos reservatórios eutróficos
Nitratos	A concentração de nitrato praticamente não muda a jusante
Nitritos	A concentração de nitritos é usualmente crescente, particularmente em reservatórios com saídas profundas e alto grau trófico
Sólidos totais	A concentração de sólidos totais diminui
Variáveis Biológicas	
Plâncton	Aumenta para Jusante
Composição do Fitoplâncton	A composição se altera para jusante, sendo que nos rios de pequeno porte mudam as espécies ribeirinhas para pelágicas e nos rios maiores aparecem mais espécies lacustres a jusante do reservatório

Tabela 4.3.26 – Efeitos na Qualidade da Água a Jusante – continuação

VARIÁVEIS	ALTERAÇÕES NA QUALIDADE DA ÁGUA A JUSANTE
Produção de Fitoplâncton	A produção específica de fitoplâncton pode ser extremamente alta quando o fitoplâncton do fundo do reservatório, rico em clorofila é lançado no rio e atinge regiões com alta incidência de luz
Zooplâncton	A jusante de um reservatório altamente enriquecido com zooplâncton pode-se ter alterações na composição potamoplancônica para uma do tipo pelágica
Zoomassa	A biomassa de zooplâncton usualmente aumenta a jusante
Bentos	Aumenta a jusante de reservatórios fracamente eutróficos, decresce a jusante de reservatórios eutróficos com camada anóxica
Peixes	O reservatório representa uma barreira para a migração de peixes. A ocorrência de peixes a jusante varia de acordo com as condições específicas

Fonte: STRASKRABA, 1993

Dependendo da cota da tomada d'água da Casa de Força, a água liberada para jusante pode ser mais fria e com menor concentração de oxigênio que a do canal de jusante. A homogenização da temperatura, do teor de oxigênio e demais gases dissolvidos na água efluente pode ocorrer somente 100 km a jusante da barragem. Além disso essas águas podem agredir as turbinas, causando corrosão e a precipitação do ferro e manganês, e liberar odores desagradáveis de gás sulfídrico. No rio a jusante da barragem pode ocorrer mortandade ou inexistência de peixes, pela ausência de oxigênio dissolvido na água.

De maneira geral, a qualidade da água em reservatórios é influenciada pela qualidade da água que entra, pela dinâmica de mistura do lago e por sua produtividade biológica. Esses aspectos decorrem das características morfométricas do reservatório (profundidade média, existência de braços com reduzida circulação de água, curvas cota x área e cota x volume), que afetam o aporte de substâncias alóctones, a produtividade, a circulação da água, a penetração da luz e a área superficial para trocas atmosféricas. O tempo de residência do reservatório define a frequência de troca da água e os padrões de circulação definem a frequência de mistura da água.

Nos itens a seguir são apresentados os aspectos estruturais e funcionais de um lago, as principais diferenças entre lagos e reservatórios e detalhados dois processos que ocorrem em reservatórios – Eutrofização e Estratificação Térmica – que comprometem a qualidade da água armazenada e da água lançada para jusante.

4.3.4.2. – Lagos e Reservatórios

Todo ecossistema lacustre estável, seja natural ou feito pelo homem, apresenta-se bastante fragmentado dos pontos de vista estrutural e funcional. São definidos quatro compartimentos distintos, conforme Figura 4.3.42 a seguir (ESTEVES, 1988).

Figura 4.3.42 – Compartimentos de um Ecossistema Lacustre

Fonte: ESTEVES, 1988

O primeiro deles, denominado região litorânea, é a transição entre os ecossistemas lacustre e terrestre, apresenta diversos nichos ecológicos, alta diversidade de espécies vegetais e animais e, conseqüentemente, elevado número de cadeias alimentares. A região pelágica, eufótica ou limnética é a região interior e superficial dos lagos e apresenta populações de algas (fitoplâncton), animais invertebrados (zooplâncton) e peixes (nécton). A região profunda dos lagos não permite o crescimento de vegetais superiores (macrófitas aquáticas) e nem de algas, na maioria dos casos. A comunidade local, chamada bentos, é constituída por animais invertebrados e bactérias. Por fim, a interface ar-água apresenta grupos de pequenos animais e plantas, denominados nêustons.

Os quatros compartimentos do lago interagem continuamente, através de trocas de energia e matéria. A luz solar é absorvida pelos vegetais e transformada, com o gás carbônico e nutrientes (fosfato, nitrato, silicato, etc), em energia química (carboidratos, lipídios e proteínas). Esse processo é denominado “produção primária”, sendo que os maiores produtores são as algas, as macrófitas aquáticas e algumas espécies de bactérias. Uma parte da produção total desses organismos é gasta na manutenção do seu próprio metabolismo e a outra parte é transformada em biomassa (produção primária líquida), que constitui a fonte de energia para as cadeias alimentares de todo o ecossistema lacustre.

Os consumidores são os organismos que obtém energia direta ou indiretamente da matéria orgânica sintetizada pelos produtores primários. Os que se utilizam diretamente da biomassa vegetal são os herbívoros (consumidores primários ou de primeira ordem), que incluem várias espécies de zooplâncton, peixes e insetos aquáticos. Os que obtém sua energia a partir dos consumidores primários, como várias espécies de microcústáceos e peixes, são chamados de carnívoros (consumidores secundários ou de segunda ordem) e assim sucessivamente.

Os organismos detritívoros alimentam-se dos restos de plantas e animais e participam da cadeia de detritos, localizam-se nos sedimentos e formam a comunidade bentônica. Os decompositores são as bactérias e fungos que decompõem a matéria orgânica, sais minerais, água e gás carbônico, promovendo a circulação de nutrientes e possibilitando seu reaproveitamento pelos organismos produtores. Portanto, são responsáveis pela reciclagem de nutrientes.

Os organismos produtores e os consumidores localizam-se na zona eufótica ou iluminada do lago, os detritívoros e os decompositores predominam na zona afótica ou não iluminada.

Na Tabela 4.3.27 a seguir constam as principais diferenças entre lagos naturais e reservatórios artificiais.

Tabela 4.3.27 – Comparação das Características de Lagos e Reservatórios

CARACTERÍSTICA	LAGOS	RESERVATÓRIOS
Diferenças Qualitativas (absolutas)		
Natureza	Natural	Feito pelo homem
Idade geológica	Velho ($\geq$ pleistoceno)	Jovem (<50 anos)
Envelhecimento	Lento	Rápido
Formado pelo preenchimento	Depressões	Vales dos rios
Forma	Regular	Dendrítica
Perímetro	Baixo	Alto
Profundidade Máxima	Próxima ao centro	Na extremidade/Barragem
Sedimentos do fundo	Autóctone	Alóctone
Gradiente longitudinal	Causado por ventos	Causado pelo escoamento
Profundidade da saída	Superficial	Profunda
Diferenças Quantitativas (relativas)		
Bacia/Área do lago	Pequena	Grande
Tempo de Residência	Alto	Baixo
Integração com a bacia	Menor	Maior
Morfometria	Forma de “V”	Forma de “U”
Flutuação dos níveis d’água	Pequena	Grande
Hidrodinâmica	Mais regular	Altamente variável
Causas dos Pulsos	Naturais	Operação humana
Suprimento de água	Raro	Comum

Fonte: STRASKRABA, 1993

4.3.4.3 – Eutrofização de Reservatórios

O processo de eutrofização de lagos e reservatórios é natural e significa o enriquecimento das águas com os nutrientes necessários ao crescimento da vida vegetal aquática (BRAGA et al., 2002). É um processo de maturação de um ecossistema lacustre, que tende a se transformar num ecossistema terrestre, utilizando a interação do lago com o meio terrestre que o circunda.

Milhares de anos podem ser necessários para que um lago apresente as condições ideais para a proliferação de peixes e ostente plantas aquáticas superiores, como as que flutuam na superfície. Quando isso ocorre, diz-se que o lago passou de oligotrófico para eutrófico. Em condições naturais ou quando controlada, a eutrofização é desejável, pois permite a multiplicação das algas que servem de alimento para os microcrustáceos, que, por sua vez, alimentam as larvas da maioria

dos peixes. É um processo reproduzido artificialmente desde o século XIX na Europa, em tanques e lagoas de piscicultura, para aumentar a produtividade de trutas e outros peixes.

Quando a eutrofização é intensa, no entanto, com abundância de nutrientes, em especial o fósforo, a produção biológica do lago aumenta descontroladamente, resultando na proliferação de algas e outros vegetais aquáticos superiores, especialmente os flutuantes, como a alface d'água e o aguapé. De acordo com a produtividade biológica pode-se ter um reservatório oligotrófico, eutrófico ou mesotrófico, conforme descrito a seguir e resumido na Figura 4.3.43:

- oligotróficos: lagos com baixa produtividade biológica e baixa concentração de nutrientes;
- eutróficos: lagos com produção vegetal excessiva e alta concentração de nutrientes;
- mesotróficos: lagos com características intermediárias entre oligotróficos e eutróficos.

Figura 4.3.43 – O Processo de Eutrofização

Fonte: BRAGA et al., 2002

A eutrofização natural é um processo demorado, que tem sido acelerado pela intervenção do homem, através de atividades industriais, agrícolas e adensamento das áreas urbanas existentes nas bacias contribuintes à reservatórios ou lagos naturais. A essa eutrofização dá-se o nome de eutrofização cultural ou acelerada, que é mais problemática que a natural, uma vez que as alterações morfológicas não tem tempo de ocorrer. Verifica-se apenas a fertilização das águas e a proliferação excessiva da vegetação aquática.

a) Eutrofização Natural

O crescimento e proliferação dos organismos fotossintetizantes aquáticos dependem de diversos nutrientes, como: oxigênio, carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre, potássio, cálcio, etc, principalmente dos quatro primeiros. A insuficiência de qualquer um desses elementos limita o crescimento dos organismos. Em geral, o nutriente limitante na natureza é o fósforo, cuja fonte exclusiva é o desgaste das rochas que contêm fosfato. O escoamento superficial das águas de chuva conduz o fosfato até o corpo d'água e daí até o lago ou reservatório. Quanto ao nutriente nitrogênio, que em geral se apresenta na forma de nitrato dissolvido na água, também é processado na forma gasosa, por alguns seres fotossintetizantes.

Além dos nutrientes, outros fatores que interferem na eutrofização são a radiação solar e a temperatura. Assim, reservatórios localizados em latitudes e altitudes elevadas – com baixas temperaturas e pouca radiação solar – são menos sujeitos à eutrofização que aqueles situados em regiões tropicais – quentes e com alta incidência de radiação solar.

Interferem também as características morfológicas do lago, sendo que os mais suscetíveis à eutrofização são os rasos, por permitirem maior influência da radiação solar, os de forma dendrítica, por disporem de maior zona litorânea e os de maior tempo de residência, pois possuem um escoamento mais lento, que favorece o crescimento das algas.

b) Eutrofização Acelerada

Nesse caso ocorre um aporte adicional de fósforo, proveniente dos esgotos domésticos, industriais e dos fertilizantes agrícolas. As fontes de fósforo de áreas urbanas são as matérias orgânicas e os detergentes e, nas áreas rurais, além dos fertilizantes, as atividades antrópicas que podem acelerar as erosões.

Outras fontes de nutrientes são a poluição do ar e queda de material da atmosfera, sob a forma de partículas ou água de chuva, e a vegetação remanescente em reservatórios não desmatados antes do enchimento. Nas Figuras 4.3.44 e 4.3.45 a seguir tem-se esquematicamente o processo de eutrofização artificial em reservatórios e os efeitos da eutrofização no metabolismo do sistema lacustre.

Figura 4.3.44 – Eutrofização Acelerada

Fonte: ESTEVES, 1988

Figura 4.3.45 – Consequências da Eutrofização no Sistema
 Fonte: ESTEVES, 1988

c) O processo de eutrofização

As principais alterações produzidas pela eutrofização dizem respeito às condições físico-químicas do meio (aumento da concentração de nutrientes e gases, como metano e gás sulfídrico, alterações significativas no pH) e às condições biológicas (alterações na diversidade e na densidade dos organismos).

O excesso de nutrientes que atinge o reservatório provoca o aumento da biomassa vegetal e alterações qualitativas, com o surgimento de novas espécies e desaparecimento de outras, com a conseqüente diminuição da penetração da luz e da aeração superficial. A camada superior do reservatório passa a ser a zona “produtora” de oxigênio, devido à presença de algas, e a camada inferior a zona “consumidora” de oxigênio, devido à presença de decompositores. Em vista da grande quantidade de matéria orgânica a ser decomposta, os peixes passam a competir com os decompositores pelo oxigênio disponível.

Nessas condições, surgem gases resultantes da atividade anaeróbica, como o gás sulfídrico e o metano, que são extremamente venenosos para a maioria dos organismos aquáticos, especialmente para os peixes, que morrem por asfixia, como ocorre com frequência na Lagoa Rodrigo de Freitas, no Rio de Janeiro, RJ.

Com o prosseguimento do processo, mesmo as espécies menos exigentes acabam desaparecendo, a camada inferior se torna anóxica, todo o oxigênio dessa camada é consumido e o fósforo assume uma forma solúvel em água, que facilita sua recirculação e provoca uma realimentação do processo. Predominam no fundo do reservatório as bactérias anaeróbicas e facultativas e, na estreita camada superficial, com oxigênio disponível, predominam as algas, macrófitas (aguapés) e organismos mortos flutuando. A camada superficial, além de mudança na cor (de azul para amarelo-esverdeado), tem sua transparência fortemente reduzida, devido ao aumento da densidade de fitoplâncton.

d) As consequências

As consequências da eutrofização podem ser classificadas em:

- impactos sobre o ecossistema e a qualidade da água: redução da biodiversidade, pois poucas espécies sobrevivem em condições adversas; alteração das espécies de algas sensíveis à disponibilidade de nitrogênio sob a forma de nitrato, sendo que a escassez do nitrato propicia o crescimento excessivo de algas azuis; alteração das espécies de peixes, pois sobreviverão apenas os que suportam baixas concentrações de oxigênio dissolvido na água; comprometimento do sabor e odor da água e redução de sua transparência em função das elevadas concentrações de compostos orgânicos dissolvidos, alguns deles precursores de compostos halogenados, como os trihalometanos, potencialmente cancerígenos, que são produzidos quando a água sofre desinfecção por cloro; alteração das características químicas da água do fundo do lago, como o pH, decorrente da decomposição anaeróbica, que libera metano, gás sulfídrico, amônia, fósforo, ferro, manganês, etc.
- impactos sobre a utilização dos recursos hídricos: o uso do reservatório para abastecimento de água fica prejudicado, pois o excesso de algas obstrui os filtros das estações de tratamento; as características químicas da água dificultam o equilíbrio do pH e o controle da floculação; são necessários equipamentos adicionais, como filtros de carvão ativado para retirada do sabor e odor desagradáveis da água e unidades para remoção do ferro e manganês; além disso, após a cloração, pode haver a formação de trihalometanos; outro aspecto negativo é que, aparentemente, a presença de grandes concentrações de algas azuis provoca epidemias de distúrbios gastrointestinais; também fica prejudicado o uso recreacional do reservatório, pelo comprometimento nos aspectos estéticos (aparência, odor), a proliferação de mosquitos, além de que o excesso de algas impede atividades como a natação e mesmo o acesso de barcos; outro uso prejudicado é a irrigação, pois ocorre a obstrução nos sistemas de bombeamento e o crescimento de aguapés nos canais; o uso do reservatório para geração de

energia elétrica se torna prejudicado, pela obstrução das grades das tomadas d'água e corrosão das turbinas e, por fim, ocorre a perda de valor comercial das propriedades localizadas às margens do reservatório.

e) Parâmetros de Controle

Alguns parâmetros da água podem indicar o risco de eutrofização do reservatório ou seu estado trófico, dentre eles:

- transparência: a luz se extingue de forma exponencial no corpo d'água. A transparência é a medida da profundidade que a luz penetra no lago; efetuada com a imersão gradativa do disco Secchi. A profundidade em que não se consegue mais enxergar o disco corresponde à profundidade Secchi (Zd) e significa que 95% da luz já se extinguiu. A fotossíntese acontece até a profundidade 3 Zd e a zona eufótica corresponde à profundidade onde se tem 1% da luz restante. Quanto menor a quantidade de sólidos em suspensão e compostos orgânicos dissolvidos no reservatório, maior a profundidade que a luz consegue penetrar e menor o risco de eutrofização. A transparência varia sazonalmente em reservatórios: durante o período de chuvas, quando ocorre um grande incremento de partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, provenientes da bacia, a transparência diminui. Nesse período, o tempo de residência no lago também é menor. Outro fator climático que reduz a transparência são os ventos, que podem misturar as camadas do reservatório;
- concentração vertical de oxigênio dissolvido (OD): o oxigênio e o gás carbônico são essenciais à vida aquática, sendo que o gás carbônico é 35 vezes mais solúvel na água. O oxigênio provem de fonte endógena, pela fotossíntese, e de fonte exógena, pelas trocas atmosféricas ou trazido pelos afluentes do reservatório. As fontes de consumo de oxigênio são a oxidação das matérias carbonáceas e nitrogenadas e do material do sedimento e a respiração dos organismos. A concentração usual de OD é de mais que 7 mg/l e a concentração de saturação é de cerca de 10 mg/l, mais precisamente de 9,2 mg/l a 20°C e ao nível do mar. A concentração de saturação diminui

quando a temperatura ou a altitude aumenta. A concentração ideal de OD para embriões de peixes de água fria (salmão e truta) é de mais que 11 mg/l (8 mg/l para peixes adultos) e para os de água quente, com temperatura superior a 20°C, é de mais de 6,5 mg/l para os embriões (6 mg/l para peixes adultos) (PORTO, 2000). Para reservatórios oligotróficos a concentração de OD se aproxima da concentração de saturação ao longo do perfil vertical, enquanto que nos eutróficos, a concentração se reduz rapidamente em direção ao fundo;

- concentração de fósforo: o fósforo é usualmente o fator limitante para o crescimento das algas e pode ser encontrado como fósforo solúvel (ortofosfato), fósforo orgânico particulado (ainda no tecido orgânico), fósforo orgânico dissolvido (em compostos orgânicos dissolvidos ou coloidal), fósforo inorgânico particulado (em minerais – rocha, ou adsorvido), fósforo inorgânico não particulado (em cadeias inorgânicas, como nos detergentes). Segundo a EPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América - o reservatório é oligotrófico se a concentração de fósforo é inferior a 10 mg/l, mesotrófico entre 10 e 20 mg/l e eutrófico para concentração superior a 20 mg/l;
- quantidade de biomassa (alga): se a quantidade de Clorofila-a, que indica a presença de algas, é inferior a 4 mg/l o reservatório é oligotrófico; entre 4 e 10 mg/l é mesotrófico e acima de 10 mg/l é eutrófico (PORTO, 2000). O tipo de alga que proliferará no reservatório depende da relação Nitrogênio:Fósforo (N:P). Se N:P é inferior a 7,2, o nitrogênio é limitante e haverá um crescimento excessivo de algas azuis. Caso contrário, se N:P é superior a 7,2, o fósforo é o nutriente limitante (PORTO, 2000). O nitrogênio pode ser encontrado como nitrogênio livre, amônia, nitrito, nitrato, nitrogênio orgânico, nitrogênio Kjeldak (amônia + nitrogênio orgânico).

f) Avaliação do Estado Trófico

– Reservatórios em clima temperado

Adota-se o modelo de balanço de massas para o fósforo, desenvolvido por Vollenweider, em 1976 (VON SPERLING, 1999), que apresenta a seguinte configuração:

$$L_p = \frac{C Z (1 + \sqrt{Tw})}{Tw} \quad (4.22)$$

onde:

L_p = aporte de fósforo ao reservatório, em $g/m^2 \cdot ano$;

C = concentração de fósforo no reservatório, mg/l ;

Z = profundidade média do reservatório, em m ;

Tw = tempo de residência da água no reservatório, em anos.

sendo que:

$Tw = V/Q_{afl}$;

$Z = V/A$;

V = volume do reservatório, em m^3 ;

Q_{afl} = vazão média afluente ao reservatório, em m^3/ano ;

A = área superficial do reservatório, em m^2 ;

– Reservatórios em clima tropical

Para reservatórios em clima tropical tem-se o modelo de Salas e Martino, de 1991 (VON SPERLING, 1999), obtido com base em informações limnológicas de 38 lagos latino-americanos e cujas parcelas têm o mesmo significado da expressão anterior:

$$Lp = \frac{3 C Z}{T_w^{3/4}} \quad (4.23)$$

Quando se explicita o termo “C”, concentração de fósforo no reservatório, resulta:

$$C = \left(\frac{Lp}{z} \right) \cdot \frac{T_w^{3/4}}{3} \quad (4.24)$$

Sendo que o aporte de fósforo ao reservatório (Lp) pode ser calculado por:

$$Lp = \frac{W}{A} = \frac{(Q_{afl} * C')}{A} \quad (4.25)$$

W = carga anual de fósforo total afluyente, em g/ano;

C' = concentração média de fósforo total na vazão afluyente, em mg/l.

Na Figura 4.3.46 a seguir consta essa relação, válida para reservatórios tropicais, com os três estados tróficos possíveis. Analisando-se a figura, conclui-se que, para uma determinada taxa anual de aporte de fósforo, o estado do reservatório pode ser oligotrófico ou eutrófico, dependendo do tempo de residência do lago. As retas de concentração de 0,030 e 0,070 g/m³ foram obtidas pela aplicação da Equação (4.24) e definem, aproximadamente, os limites entre os estados tróficos (SALAS; MARTINO, 1988).

Figura 4.3.46 – Eutrofização em Reservatórios Tropicais

Fonte: SALAS; MARTINO, 1988

g) Exemplos de Reservatórios com Problemas de Eutrofização

- Processos mais comuns no Brasil

O processo de envelhecimento dos reservatórios brasileiros tem origens variadas (TUNDISI et al., 1993). Na região amazônica, por exemplo, os processos químicos e biológicos que ocorrem nos reservatórios dependem muito mais da decomposição da vegetação inundada do que da qualidade da água afluente. Por sua vez, a velocidade da decomposição depende do tempo de residência, da profundidade média e da área do reservatório. No caso do Reservatório da UHE Samuel, verificou-se a depleção do OD e a mortandade

de peixes na região mais profunda do lago, logo após a inundação da floresta submersa pelo reservatório. No reservatório de Tucuruí, no entanto, o enchimento foi seguido por um grande aumento de material orgânico particulado, originário da floresta inundada e, a seguir, por um aumento na biomassa de peixe, porém com pouca variedade de espécies.

No caso do reservatório de Tucuruí, foram necessários dez anos após o enchimento para atingir a decomposição total da floresta tropical inundada. Isso depende do tempo de residência no reservatório, no caso de 48 dias, que provoca escoamentos rápidos e decomposição acelerada da matéria orgânica no canal principal. Nos braços do reservatório, em regiões de águas tranqüilas, a decomposição pode ser mais lenta.

O padrão de envelhecimento dos reservatórios situados na bacia do Prata é diferente, dependendo principalmente da qualidade da vazão afluente, comprometida por esgotos domésticos e industriais sem tratamento e por escoamento de água de áreas cultivadas, que contém altos teores de fertilizantes.

No caso da bacia do rio São Francisco, região do semi-árido, a eutrofização dos reservatórios tem, como principal fonte, a entrada de fertilizantes químicos, pesticidas e herbicidas, provenientes das culturas irrigadas. A água se apresenta com altas concentrações de sedimentos, fósforo e nitrogênio.

Uma situação especial ocorre nos reservatórios da bacia superior do Paraná, que formam uma cascata, existindo a possibilidade de que os superiores provocassem a aceleração da eutrofização nos inferiores, pela transferência de nutrientes na cascata. Apesar da densidade populacional, da industrialização da região e das culturas existentes na bacia, não se verificam níveis elevados de nutrientes nos reservatórios de jusante.

De fato, as áreas urbanas e industriais da Grande São Paulo são responsáveis por uma alta contribuição de esgotos “in natura” e efluentes industriais, da ordem de 25 m³/s no início da década de 90 (TUNDISI; MATSUMURA-

TUNDISI; CALIJURI, 1993), que aumentam a concentração de nutrientes no rio Tietê. As principais culturas da zona rural, de cana de açúcar, milho e outras, que utilizam grandes quantidades de fertilizantes e pesticidas/herbicidas, também contribuem com grandes quantidades de nutrientes. Além das fontes citadas, a região do Alto Paraná apresenta alto nível de erosão, devido à práticas agrícolas danosas. Estima-se que a erosão dos solos lateríticos no sudeste do Brasil é da ordem de 20 t/ha.ano (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993).

Portanto, seria de se esperar que os reservatórios do Alto Paraná fossem todos eutróficos, mas os de jusante são oligotróficos. Uma das explicações para esse fato (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993) é que o fosfato está preso nos reservatórios, precipitado no fundo sob a forma de fosfato férrico, juntamente com os sedimentos provenientes das erosões. Em 1983 foi medido um valor extremamente alto (513,6 ppm ou mg/l) de fosfato nos sedimentos do reservatório de Barra Bonita (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993), sugerindo que os sedimentos e também a água intersticial aprisionam os nutrientes.

O fósforo medido nos afluentes não barrados do rio Paraná, situados na sua margem esquerda, no estado de São Paulo, apresentou concentração média anual de $283 \pm 157 \mu\text{g/l}$ (AGOSTINHO; VAZZOLER; THOMAZ, 1995). Por outro lado, a concentração média na saída do reservatório de Jupia, o último de uma série de reservatórios situados nos rios Grande, Tietê e Paraná, é de $20 \pm 8 \mu\text{g/l}$, confirmando que o fósforo se precipita nos reservatórios.

– Reservatórios do Médio Tietê

A cascata do médio Tietê fora analisada no início dos anos 90, incluindo cinco reservatórios: Barra Bonita, Bariri, Ibitinga, Promissão e Nova Avanhandava (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993). Em 1998 uma nova campanha de estudos foi realizada, dessa vez incluindo mais dois reservatórios a jusante: Três Irmãos e Jupia, este último já no rio Paraná

(BARBOSA et al, 1999). Entre os dias 2 e 11 de fevereiro de 1998 foram coletadas amostras integradas verticalmente em 4 a 8 estações em cada reservatório e também no rio Tietê, a montante do primeiro reservatório. Foram medidos o teor de OD, a condutividade, a temperatura, o fitoplâncton (quantidade e qualidade) e a clorofila-a. As Figuras 4.3.47 e 4.3.48 mostram o comportamento dos diversos parâmetros em cada reservatório e em relação à estação de montante do rio Tietê.

Figura 4.3.47 – Perfil Vertical de Algumas Variáveis nos Reservatórios do Médio Tietê em 1998

Fonte: BARBOSA et al, 1999

Figura 4.3.48 – Razão de Redução de Variáveis Químicas dos Reservatórios, com Relação aos Valores Medidos no Rio Tietê

Fonte: BARBOSA et al, 1999

As amostras coletadas no rio Tietê, a montante da cascata, comprovaram sua característica principal, que é a grande quantidade de nutrientes e material em suspensão. Da análise da Figura 4.3.48 observa-se que a maior redução dos sólidos totais e inorgânicos em suspensão se dá no reservatório de Barra Bonita, enquanto que os sólidos orgânicos em suspensão se estabilizam apenas no reservatório de Bariri. Quanto aos nutrientes, a redução é considerável no reservatório de Barra Bonita, passando para valores entre 25% e 50% das concentrações afluentes. Contudo, a concentração de

clorofila-a apresentou um aumento brusco nos três primeiros reservatórios, decrescendo a seguir. Isso significa que houve um aumento na concentração de fitoplânctons em Barra Bonita, Bariri e Ibitinga. Além da quantidade, a espécie de fitoplâncton dominante nesses reservatórios, na época, era a “*Microcystis spp*”, da família das Cianofíceas, típica de lagos eutróficos. Nas pesquisas efetuadas em 1998, a quantidade de Cianofíceas, representada pelas algas do tipo “*Microcystis Aeruginosa*”, era de 34% do total da biomassa em Barra Bonita, crescendo para 75% e 78% em Bariri e Ibitinga, respectivamente. Em Promissão a contribuição de Cianofíceas se reduziu para 12% do total e a concentração de Clorofila-a acompanhou essas variações.

Quando se compararam os dados das duas campanhas de análise da qualidade da água, a de 1991 e a de 1998, concluiu-se que houve uma piora sensível nos reservatórios superiores, principalmente no de Barra Bonita, confirmando sua rápida eutrofização. Os níveis de Nitrogênio subiram 2,7 vezes, a concentração de fósforo dobrou, os valores de clorofila-a aumentaram 3 vezes e ocorreu um acréscimo de 11% nos sólidos totais em suspensão.

– Reservatório de Barra Bonita

Esse reservatório apresenta uma peculiaridade, pois é o primeiro reservatório da cascata do médio Tietê após a confluência com o rio Piracicaba, recebendo toda a contribuição orgânica urbana e industrial da Grande São Paulo, e da região agrícola de Piracicaba. Sua área é de 310 km², tem 141 MW da capacidade instalada e entrou em operação em 1964. O tempo de residência varia de 30 a 300 dias, dependendo da sazonalidade das chuvas.

Na ocasião da campanha de coleta de amostras nos reservatórios do Tietê (fevereiro de 1998), o reservatório de Barra Bonita se encontrava estratificado (ver próximo item), com um termoclina situado entre 6,50 e 11,00 m de profundidade, com 1,6°C de diferença de temperatura entre a superfície e o fundo. Quanto ao OD, observou-se que a concentração decresceu de 5 mg/l, na superfície, para zero a aproximadamente 8 m de profundidade, indicando

um hipolímnio completamente anóxico. O nível de pH variou de 7 na camada superior para 6,5 nas mais profundas, acompanhando a estratificação térmica constatada. Por outro lado, o perfil de condutividade elétrica no reservatório se mostrou invertido, com condutividade máxima nas camadas superficiais, sugerindo uma instabilidade da coluna d'água, causada, provavelmente, pela combinação da ação de ventos e da operação do reservatório.

Dos registros visíveis do processo de eutrofização, o reservatório de Barra Bonita apresenta freqüentes ciclos de floração de “*Microcystis Aeruginosa*”, tipo de alga que cresce nos períodos de maior tempo de residência do reservatório. Conforme pesquisas, nos reservatórios eutróficos da Bacia do Prata, predomina o fitoplâncton sobre o perifiton e as macrófitas, e em especial o fitoplâncton do tipo Cianofíceas, como a mencionada “*Microcystis Aeruginosa*”. As macrófitas (aguapés) que aparecem em Barra Bonita também são comuns nos reservatórios eutróficos da Bacia do Prata, do tipo “*Eichhornia Crassipes*”.

A produção primária de fitoplâncton em Barra Bonita é baixa no verão, pois a entrada de maiores volumes de sedimentos em suspensão trazidos pelas chuvas reduz a transparência das águas e as maiores vazões reduzem o tempo de residência. No inverno, quando a transparência e o tempo de residência são maiores e a instabilidade térmica da coluna d'água também é maior, facilitando a mistura das camadas, os nutrientes do fundo são levados para a zona eufótica, aumentando o risco de eutrofização.

4.3.4.4 – Estratificação Térmica de Reservatórios

“Lagos profundos tendem a desenvolver uma estrutura térmica estável que coíbe os processos de mistura por diferenças de densidade da água. Uma camada mais fria permanece no fundo estagnada, sob uma camada mais quente e turbulenta na superfície. A essa formação dá-se o nome de Estratificação Térmica, sendo uma das principais causas da alteração da qualidade da água em lagos e reservatórios”. (PORTO, 1991).

Vários fatores afetam o processo, como os meteorológicos – a radiação solar, os ventos, a umidade relativa do ar, a temperatura do ar, a cobertura de nuvens – e os hidrodinâmicos – movimentação da massa líquida provocada pelas vazões afluente e efluente e pela ação dos ventos.

Como consequência da redução da mistura da água no reservatório, a camada inferior passa a apresentar menor teor de oxigênio dissolvido e maior teor de ferro, manganês e gás sulfídrico. Dependendo da altura da tomada d'água no reservatório, a água lançada para jusante terá baixa qualidade, prejudicando o rio.

A estratificação térmica afeta tanto os reservatórios de regiões temperadas como os de regiões tropicais, pois apesar do gradiente de temperatura entre as camadas ser maior nos lagos temperados, a estabilidade térmica ocorre da mesma forma, visto que a densidade da água decresce exponencialmente com o aumento de temperatura. Assim, encontram-se estabilidades equivalentes para lagos tropicais, com gradiente de 5°C (25°C e 30°C), e para lagos temperados, com gradientes de 12°C (8°C e 20°C).

Ao penetrar na água, a radiação solar sofre um decaimento exponencial e a radiação de ondas longas (infravermelha), responsável pela transmissão de calor, é quase que totalmente absorvida no primeiro metro de profundidade do lago. Como consequência, ocorre uma sensível diferença de temperatura entre a superfície e o fundo dos lagos. Após um determinado período de aquecimento, e em condições teóricas, o perfil vertical de temperatura deveria se assemelhar ao perfil vertical de extinção da radiação, que é exponencial. Contudo, tendo em vista a presença de material em suspensão, que altera a transparência da água, e, principalmente, a ocorrência de ventos, que atuam sobre a superfície, e de correntes de convecção geradas pelo resfriamento causado pela evaporação, resulta uma turbulência na superfície que dispersa o calor em direção a profundidades maiores. Na Figura 4.3.49 a seguir são mostradas as curvas típicas de decaimento da luz incidente e do perfil vertical de temperatura do lago.

A forma do perfil de temperatura está detalhada na Figura 4.3.50, mostrando três camadas distintas de diferentes temperaturas. O lago se estabiliza conforme essa

divisão, mantendo uma camada superior mais quente e leve e uma camada inferior mais fria e densa.

A camada superior, chamada de epilímnio, é mais quente, mais turbulenta e com temperatura aproximadamente uniforme. A camada inferior, chamada de hipolímnio, é mais fria, com baixos níveis de turbulência. A camada intermediária, denominada metalímnio, contém um plano virtual intermediário, denominado termoclina, que passa pelo ponto de máximo gradiente do perfil vertical de temperatura ($\delta^2 T / \delta z^2 = 0$).

Em geral o epilímnio corresponde aproximadamente à região limnética do lago e o hipolímnio à região profunda. Nos lagos muito transparentes ou muito turvos as linhas de divisão podem não estar tão próximas.

Figura 4.3.49 – Curva de Decaimento Exponencial da Luz Solar (A) e Perfil Vertical de Temperatura do Lago (B)

Fonte: COLE, 1988 apud PORTO, 1991

Além da estratificação térmica, mais comum, outro tipo que pode ocorrer é a estratificação química do lago, em que a diferença de densidade entre camadas é gerada por diferença na concentração de sais, por exemplo nos açudes do Nordeste do Brasil e em lagos salinos, estuários e regiões oceânicas. Uma concentração de 10 mg/l de sal na água reflete-se em uma variação de temperatura entre 4 e 5°C. A salinidade pode ter origem geoquímica, acentuada pela irrigação, ou origem nas precipitações atmosféricas, em reservatórios próximos ao mar.

Figura 4.3.50 – Perfil Vertical de Temperatura de Um Lago Estratificado

Fonte: COLE, 1988 apud PORTO, 1991

a) Tipos de Estratificação Térmica

A estratificação térmica que ocorre no verão (temperaturas das camadas superiores a 4°C) é chamada “direta”, quando uma camada mais quente, portanto mais leve, flutua sobre uma outra mais fria e densa. A estratificação “inversa”

ocorre no inverno dos países temperados, quando a camada superior tem temperatura abaixo de 0°C, formando gelo (menos denso), e a camada inferior é um pouco mais quente e, portanto, mais densa. Isso se deve à anomalia da curva de densidade da água (Figura 4.3.51), que apresenta o valor máximo de 1 g/ml para a temperatura de 4°C.

Figura 4.3.51 – Variação da Densidade da Água com a Temperatura

Fonte: LOFTIS, 1984 apud PORTO, 1991

Lagos de regiões temperadas passam por duas épocas de estratificação ao ano. Durante o inverno ocorre um período de estratificação térmica inversa, com gelo flutuando na superfície. Com a chegada da primavera, a temperatura superficial aumenta, o gelo começa a derreter e a densidade dessa camada aumenta. Tornando-se mais pesada, essa camada afunda e promove a mistura de todo o lago, levando à isoterminia das camadas. O aumento da temperatura com a chegada do verão provoca nova estratificação, desta vez na forma direta. No outono inicia-se um período de redução da temperatura superficial, até que ela atinge a temperatura da camada do fundo. Nesse momento, forças externas de pequena magnitude, tais como o vento, podem misturar as camadas superior e inferior, que se apresentam com a mesma

densidade. O resfriamento prossegue, até que a camada superior fique com máxima densidade, a 4°C, quando, então, afunda, levando o lago novamente à isoterminia (Figura 4.3.52).

Figura 4.3.52 – Seqüência de Perfis de Temperatura Observados Durante Um Ano, Num Lago de Região Temperada no Hemisfério Norte.

Fonte: WARD, 1988 apud PORTO, 1991

Na maioria dos lagos naturais brasileiros, quase sempre rasos, a circulação total da coluna d'água se dá a nível diário (24 horas), graças ao resfriamento da camada superficial durante a noite, que se iguala com a temperatura da camada do fundo e mistura. Durante o dia esses lagos estratificam. São exemplos os lagos amazônicos, os lagos costeiros e do Pantanal Matogrossense (ESTEVES, 1988).

b) Classificação dos Lagos quanto à Estratificação Térmica

A classificação mais moderna dos lagos quanto ao número de vezes em que ocorre a mistura das camadas é (HUTCHINSON-LÖFFLER, 1956 apud PORTO, 1991):

- amícticos: lagos permanentemente estratificados, situados em regiões polares ou muito altas, cobertos por gelo (estratificação inversa);

- monomíticos: misturam-se uma única vez ao ano. Ocorre em lagos subtropicais, que permanecem estratificados durante todo o verão e isotérmicos durante o inverno, denominados “monomíticos quentes”. Ocorre também em lagos de regiões temperadas, que se misturam uma única vez porque a temperatura da camada superficial não excede 4°C, que são os “monomíticos frios”;
- dimíticos: lagos que sofrem a mistura completa duas vezes ao ano, passando da situação de estratificação para a de isoterminia;
- polimíticos: misturam completamente mais de duas vezes ao ano. São lagos geralmente rasos, com grande extensão e fracamente estratificados, sendo que com pouco vento ou na época das cheias já recebem energia suficiente para promover a mistura ou então misturam diariamente;
- oligomíticos: são lagos profundos que se localizam em regiões tropicais úmidas, onde ocorre pouca variação sazonal de temperatura. Durante a noite pode ocorrer queda da temperatura superficial da água, mas não a ponto de misturar as camadas. A mistura ocorrerá apenas nas ocasiões em que houver um período prolongado com baixas temperaturas atmosféricas, que resfrie suficientemente a camada superficial;
- meromíticos: lagos que raramente se misturam, permanecendo estratificados por anos, misturando apenas a camada superficial. Essa classificação corresponde, geralmente, a lagos com estratificação química.

Os lagos que misturam completamente pelo menos uma vez ao ano também são chamados de holomíticos. Na Figura 4.3.53 têm-se os tipos de comportamento de lagos mencionados, associados à sua latitude e altitude. Os tipos de reservatórios que ocorrem com mais frequência no Brasil, quanto ao regime de mistura, são os polimíticos e monomíticos quentes, com alguns poucos oligomíticos.

Figura 4.3.53 – Variação do Regime de Mistura com a Localização do Lago.

Fonte: HENDERSON SELLERS, 1984 apud PORTO, 1991

c) Lagos e Reservatórios

A estratificação térmica apresenta-se de forma diferenciada em lagos naturais e em reservatórios, pelas seguintes razões:

- tempo de residência da água nos reservatórios é, em geral, inferior ao dos lagos;
- a efluência dos lagos se dá pela superfície, enquanto que nos reservatórios as saídas se localizam no fundo ou em alturas variadas;
- a bacia hidrográfica contribuinte aos reservatórios é grande, comparativamente à dos lagos, com maior transporte de sedimentos e, conseqüentemente, maior turbidez nos reservatórios.

Todos esses fatores são importantes na formação da estratificação térmica. No caso do tempo de residência (T_w), por exemplo, os reservatórios com baixo T_w são mais turbulentos e, portanto, menos sujeitos à estratificação. Assim, reservatórios com T_w menor que um mês apresentam estratificação fraca e instável e a mistura é comandada por fatores advectivos (ventos ou vazões de entrada e de saída). Já nos reservatórios com T_w maior que seis meses a estratificação é bem definida e estável e a mistura ocorre mediante o aporte de calor pela interface ar-água.

Na Tabela 4.3.28 a seguir tem-se alguns exemplos de reservatórios brasileiros que estratificam e o tipo de mistura que ocorre.

Tabela 4.3.28 – Ocorrência de Estratificação Térmica em Reservatórios Brasileiros

BARRAGEM	T_w (dias)	$Z_{m\acute{a}x}$ (m)	ESTRATIFICAÇÃO	
			TIPO	ΔT (°C)
Tucuruí, PA	48	70	M, Q	2
Três Marias, MG	340	66	M, Q	4
Paraibuna, SP	800	104	M, Q	5
Americana, SP	30	25	P	5
Jaguari-Jacareí, SP	510	50	M, Q	7

M, Q = monomítico quente; T_w (dias) = tempo de residência; P = polimítico; $Z_{m\acute{a}x}$ (m) = profundidade máxima; ΔT (°C) = diferencial máximo de temperatura entre a superfície e o fundo do lago.

Fonte: PORTO, 1991

A estratificação térmica é importante, porque a temperatura afeta todos os processos químicos e biológicos que ocorrem no lago. Uma vez estratificado, os processos de transmissão de calor e massa no reservatório são inibidos, comprometendo a qualidade de sua água.

d) O processo de estratificação

As fontes de oxigênio para lagos ou reservatórios são a fotossíntese, a entrada de tributários e a reaeração pelo contato com a atmosfera, que depende da agitação da superfície, provocada pelos ventos, ondas, etc. De acordo com HENRY (1999), a fonte principal de aporte de oxigênio em Tucuruí são os tributários, sendo que, do total de 13.047 t de O_2 /dia que entram no reservatório, 7.123 t (55%) provem dos tributários, 4.822 t (37%) da reaeração superficial e 1.102 (8%) são produzidas pelo fitoplâncton.

Quando um reservatório está estratificado, o oxigênio é produzido e incorporado no epilímnio, junto à superfície, praticamente coincidindo com a zona eufótica (ou limnética), que é a zona onde se produz toda a biomassa de origem fotossintética. Dessa forma o nível de oxigênio dissolvido (OD) do epilímnio é bastante próximo da saturação durante todo o ano. O oxigênio deveria ser consumido no hipolímnio, onde ocorre a decomposição da matéria orgânica. Porém, o termoclina dificulta a passagem do calor e do OD no sentido vertical descendente do lago. A transmissão então se dá apenas por difusão molecular, processo que não consegue repor o grande consumo de oxigênio representado pela decomposição. Na Figura 4.3.54 a seguir tem-se o esquema desse processo. O perfil de concentração do OD na vertical se torna bastante semelhante ao da temperatura, com uma zona intermediária onde a variação é mais rápida e onde ocorre a oxiclina (Figura 4.3.55). Por outro lado, os nutrientes resultantes da decomposição são acumulados no hipolímnio, podendo empobrecer a zona eufótica e reduzir a produtividade primária do sistema.

Figura 4.3.54 – Processo de Produção e Consumo de Oxigênio Num Lago Estratificado

Fonte: BRAGA et al., 2002

Figura 4.3.55 – Exemplo de Perfis Verticais de Concentração de Oxigênio ao Longo do Tempo

Fonte: BRAGA et al., 2002

Quando ocorre a mistura das camadas, a concentração do OD e de nutrientes se homogeniza, acompanhando a isotermia do lago. No caso de reservatórios novos, ainda em processo de decomposição da vegetação submersa, o hipolímnio pode permanecer anóxico por alguns anos, mesmo durante as fases de isotermia vertical. Em geral esse problema dura cerca de 3 a 4 anos, mas já ocorreram

casos de reservatórios que demoraram 20 anos para atingir o equilíbrio. No período em que o reservatório está estratificado, no entanto, a concentração do OD no hipolímnio vai diminuindo e, à medida que se aproxima de zero, tem-se a alteração do ambiente oxidante para um redutor, com as conseqüentes transformações químicas.

A água anóxica do hipolímnio possibilita a liberação do ferro e do manganês do sedimento do fundo e aumenta a concentração de fosfato, amônia, silicatos, carbonatos, íons de cálcio e gás sulfídrico. Aumenta também o teor de dióxido de carbono (CO_2) produzido pelo processo de respiração e, conseqüentemente, as quantidades de bicarbonato de cálcio a ácido carbônico em solução.

No epilímnio, o fitoplâncton utiliza o CO_2 no processo de fotossíntese, em parte retirado da solução em equilíbrio de bicarbonato de cálcio, precipitando o carbonato de cálcio. O epilímnio se torna menos alcalino quando o reservatório estratifica, devido à diminuição dos bicarbonatos e precipitação do carbonato.

e) Mistura em Reservatórios

A estratificação térmica afeta os processos de mistura das camadas no reservatório. Num reservatório isoterma, misturado, homogêneo quanto à densidade da água, o centro de volume coincide com o centro de massa. Num estratificado, como a camada do fundo é mais densa, o centro de massa está abaixo do centro de volume, portanto, é necessário introduzir energia para realizar o trabalho de erguer o centro de massa contra a ação da gravidade.

A energia potencial de um reservatório pode ser definida como:

$$EP = m g H = \int_0^{Z_m} g Z A(z) \rho(z,t) dz \quad (4.26)$$

onde:

m = massa total no reservatório, em kg;

g = aceleração da gravidade, em m/s^2 ;

H = altura do centro de massa do reservatório, em m;

Z_m = elevação máxima do nível d'água, em m;

Z = elevação a partir do fundo do reservatório, em m;

$A(z)$ = área horizontal do reservatório na elevação z , em m^2 ;

ρ = densidade da água na elevação z e tempo t , em kg/m^3

A energia potencial de um reservatório pode ser alterada, modificando-se a densidade da água através do aquecimento ou resfriamento da massa d'água. A energia potencial de um reservatório misturado é maior que a de um estratificado por densidade.

Os processos de transporte de massa ou energia que produzem a mistura das camadas são:

- advecção: é o processo de transporte pelo campo de velocidades do meio fluido. Tem como fonte o vento e os fluxos de entrada e de saída do reservatório;
- difusão molecular: é o processo de transferência por movimento randômico das moléculas do fluido na direção da diminuição do gradiente de concentração, sem que haja movimento do fluido;
- difusão advectiva: difusão com o fluido em movimento (equivale à soma da difusão com a advecção);
- difusão turbulenta: ocorre quando o regime do movimento do fluido é turbulento e a mistura ocorre mais rapidamente que no regime laminar;
- dispersão: é a mistura decorrente da combinação da difusão com o perfil de velocidade do fluido, quando é afetado pelo atrito;
- convecção: é a tendência de flutuação que ocorre com as camadas mais quentes, quando o perfil de densidade da água se altera. A noite a camada superior dos reservatórios esfria e tende a afundar por ter se tornado mais densa. A camada inferior tende a se deslocar para cima e assim sucessivamente.

Quanto às fontes de energia para possibilitar os processos de mistura da água em reservatórios tem-se, conforme Figura 4.3.56:

- transferência de calor pela interface ar-água. O aquecimento e o resfriamento assim induzidos afetam o regime de mistura pela alteração da densidade da água e, conseqüentemente, da energia potencial do reservatório e, durante o resfriamento, provocam a mistura convectiva. Esse processo é mais comum em regiões temperadas;
- mistura advectiva gerada pela movimentação das vazões de entrada e de saída do reservatório. Em regiões tropicais, nas quais as temperaturas do ar não variam significativamente ao longo do ano, esse é o processo mais comum;
- mistura provocada pela turbulência induzida pelo vento.

- 1-Taxa de Descarga que determina o tempo de retenção
- 2-Circulação gerada por ventos
- 3-Afluências de precipitação e escoamento superficial (não pontuais)
- 4-Descarga do rio com componentes de profundidade, velocidade e transporte
- 5-Escoamento pela turbina
- 6-Escoamento pelo vertedouro

Figura 4.3.56 – Representação Esquemática dos Principais Processos Atuantes em Reservatórios

Fonte: TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993

Os processos meteorológicos comandam a transferência de calor e os processos hidrodinâmicos comandam a movimentação das vazões e a turbulência induzida pelo vento.

A transferência de energia pela interface ar-água pode ser visualizada na Figura 4.3.57 a seguir, que mostra as principais formas de troca energética. Os valores entre parênteses correspondem à magnitude de cada parcela e à faixa de variação diária para latitudes intermediárias.

Figura 4.3.57 – Principais Trocas Energéticas através da Interface Ar-Água

Fonte: EDINGER et al., 1974 apud PORTO, 1991

A temperatura da água é consequência dos processos de troca apresentados, que dependem da estação do ano, da hora do dia, da localização do reservatório (latitude, longitude, altitude), da umidade relativa do ar, cobertura de nuvens, ventos e da pressão de vapor.

O balanço energético resulta em:

$$H_n = (H_s + H_a - H_{sr} - H_{ar}) - (H_{br} + H_e \pm H_c) \quad (4.27)$$

Onde:

H_n = energia disponível na superfície do lago;

H_s = radiação solar de ondas curtas;

H_a = radiação atmosférica de onda longa;

H_{sr} = parcela refletida da radiação de onda curta;

H_{ar} = parcela refletida da radiação de onda longa;

H_{br} = radiação de onda longa emitida pela água;

H_e = perda de calor na evaporação;

H_c = transferência de calor por condução.

As quatro primeiras parcelas desse balanço são afetadas apenas pelos fenômenos meteorológicos, enquanto que as demais dependem da temperatura da superfície do lago, além de outros fatores, como temperatura do ar, pressão de vapor e vento.

O vento provoca a mistura em reservatórios tanto diretamente, pelo atrito gerado na superfície, como indiretamente, pelas correntes de circulação geradas por ele. O vento produz ondas superficiais, correntes de circulação, seiches e turbulências. A energia disponível a partir do vento é proporcional ao cubo da sua velocidade e ao quadrado da área livre da superfície líquida.

Ondas superficiais atuam no epilímnio de lagos estratificados e em lagos isotérmicos e misturam a água até uma profundidade equivalente à metade do comprimento da onda. As correntes de circulação superficiais apresentam intensidade decrescente de forma exponencial em direção ao fundo do reservatório. São afetadas pelas correntes geradas pelas vazões de entrada e saída do reservatório e pela sua forma.

Seiches são ondas estacionárias produzidas por vento atuando numa dada direção durante um certo período. Fazem com que a água se acumule na margem

correspondente à direção do vento e, dependendo de sua intensidade e da condição de estratificação do lago, podem provocar a mistura das camadas superficial e profunda.

Correntes de Langmuir são associadas à ondas superficiais geradas por ventos de mais de 3 m/s. A turbulência das ondas superficiais produz uma instabilidade que se propaga para baixo, como num processo convectivo, misturando o epilânio.

Com relação às vazões de entrada nos reservatórios, a tendência da vazão afluente é se acomodar na camada de água cuja densidade seja similar à sua. A densidade da vazão afluente depende da temperatura e da concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão. Pode-se ter três situações típicas, conforme Figura 4.3.58 a seguir.

Caso a densidade da água que entra seja menor ou igual à da camada superior do reservatório, será formada uma corrente superficial. Se for maior ou igual à da camada profunda, será formada uma corrente inferior. Caso a densidade se situe entre os valores superficiais e profundos, a pluma penetrará numa região intermediária, de densidade mais próxima à sua.

Figura 4.3.58 – Correntes de Densidade Advindas da Vazão Afluente

Fonte: EPA, 1990 apud PORTO, 1991

O processo de entrada de água sempre provoca mistura pela turbulência gerada, especialmente na camada na qual a corrente de densidade penetra, além de alterar a energia potencial do reservatório, introduzindo energia cinética. Quanto maior a vazão de entrada, mais extensa será a mistura provocada. Se a densidade dessa vazão for inferior à da camada superficial, ela flutuará e a mistura dependerá dos demais processos de origem convectiva (como ventos e vazão de saída). Isso ocorre na primavera, quando o rio se aquece mais rapidamente que o reservatório.

No outono, a água do rio esfria mais rapidamente que a do reservatório e a corrente de densidade irá mergulhar, provocando mistura no hipolímnio.

As correntes que se infiltram à média altura no reservatório movem-se horizontalmente, mas a turbulência é logo dissipada, devido ao forte gradiente de densidade que existe no metalímnio.

As vazões de saída geram correntes de circulação que induzem o processo de mistura pela turbulência associada. As correntes são formadas pela transformação da energia potencial em energia cinética, no escoamento através do orifício de saída.

A área afetada pela corrente de saída é função da posição das saídas, da estabilidade da estratificação, da vazão e da geometria do reservatório. Na Figura 4.3.59 tem-se alguns exemplos de áreas afetadas, em função da posição da saída.

Em lagos misturados o fluxo se aproxima da tomada d'água de forma radial, com contribuições provenientes de todas as direções. Nos estratificados e com tomadas d'água localizadas à meia altura, o comportamento é diferente, conforme Figura 4.3.60 a seguir.

Figura 4.3.59 – Zonas de Influência da Vazão de Saída

Fonte: WUNDERLICH e ELDER, 1973 apud PORTO, 1991

Figura 4.3.60 – Distribuição de Velocidades para Reservatórios Não Estratificados (A) e Estratificados (B)

Fonte: HENDERSON-SELLERS, 1984 apud PORTO, 1991

Nos lagos estratificados o alcance da influência da vazão de saída varia com a magnitude dessa vazão, sendo que as vazões baixas mobilizam apenas uma camada estreita interna do hipolímnio, pois o arraste de água não é suficiente para vencer a força de flutuação do termoclina (Figura 4.3.61a). Conforme a vazão cresce, a zona de arraste aumenta e alcança todo o hipolímnio. Para grandes vazões o arraste supera a estabilidade do termoclina, que mergulha, permitindo que toda a coluna líquida contribua para o fluxo, inclusive o epilímnio.

Figura 4.3.61 – Linhas de Fluxo na Saída do Reservatório

Fonte: FISCHER et al, 1979 apud PORTO, 1991

f) Conseqüências

A qualidade da água liberada para jusante de um reservatório que estratifica dependerá da altura das tomadas d'água e da época do ano, isto é, pode ter qualidade pior durante o período de estratificação térmica. Tomadas profundas retiram água do hipolímnio, mais fria, sem OD, rica em gás sulfídrico, com baixo pH e altas concentrações de matéria orgânica, fosfatos, ferro e manganês. Pode ocorrer mau cheiro no rio a jusante, mortandade de peixes, baixo teor de OD por grandes extensões do rio, corrosão das máquinas e problemas com a precipitação

do ferro e manganês. Peixes de águas quentes e turvas podem não se adaptar em águas frias e límpidas.

Em compensação, tomadas d'água superficiais liberam água mais quente e de melhor qualidade, do epilímnio, com altas concentrações de OD e baixas concentrações de nutrientes. Nesse caso, em países de clima frio, pode ocorrer impacto sobre as espécies de peixes de jusante, pois algumas delas, com a truta, estão habituadas a águas com baixas temperaturas.

Os reservatórios com saídas superficiais agem como exportadores de calor e acumuladores de nutrientes, enquanto aqueles com saídas profundas agem como exportadores de nutrientes e acumuladores de calor. As alterações da qualidade d'água a jusante de barragens afetam as espécies e população de peixes de três maneiras: não atendendo os limites de tolerância de alguns parâmetros básicos da água, como teor de OD; não atendendo à temperatura da água à que as espécies mais exigentes estão habituadas, comprometendo assim sua reprodução, desenvolvimento e sobrevivência; alterando o equilíbrio natural entre predadores e presas, devido à variação de turbidez da água, por exemplo.

Apesar desses riscos, já foram observados casos em que a liberação de água do epilímnio, rica em algas, trouxe um aumento da população de peixes a jusante (PORTO, 1991).

Quanto à melhoria da qualidade da água reservada tem-se que, caso a tomada d'água se situe na mesma altura da camada onde a vazão de entrada penetra, por semelhança de densidade, haverá a passagem direta da água, sem misturar as outras camadas. Por outro lado, as tomadas de fundo retiram a água de pior qualidade do reservatório, com altas concentrações de fosfato, minimizando a possibilidade de eutrofização.

g) Exemplos de Reservatórios com Problemas de Estratificação Térmica

– UHE Capivari

O reservatório da UHE Governador Parigot de Souza (Capivari – Cachoeira) da COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica – manifestou, após um ano do início da operação, estratificação direta, no verão, aliviada no inverno. Foram registradas obstruções dos trocadores de calor, causadas por bactérias e algas, que prejudicaram a geração, e a presença de grandes volumes de gás sulfídrico, com a conseqüente corrosão de equipamentos. A solução adotada foi a combinação de uma série de medidas, como: a operação freqüente da comporta de fundo da barragem, de forma a provocar a mistura das camadas superior e inferior do reservatório; o tratamento da água de refrigeração; a ventilação forçada da caverna e a injeção de ar no fundo do reservatório, próximo das tomadas d'água.

– UHE Tucuruí

O reservatório dessa usina tem 2.430 km² de área inundada, 45.800 x 10⁶ m³ de volume, 75 m de profundidade máxima e 18,9 m de profundidade média. Seu enchimento foi iniciado em 06/09/1984 e concluído em 30/03/1985. No período de estiagem de 1986 a UHE se encontrava com 1.650 MW instalados, de um total de 4.000 MW previstos na primeira fase de motorização (12 grupos turbina-gerador de 330 MW cada, mais 2 unidades auxiliares de 20 MW cada) e de 7.960 MW previstos na segunda fase (mais 12 unidades de 330 MW cada) (BASTOS; ARAÚJO; FORTES apud PORTO, 2000).

Na estiagem de 1985 já fora observada a presença de uma camada, no fundo do reservatório, sem OD, principalmente pelo fato do enchimento do reservatório ser recente e a degradação da biomassa inundada estar apenas se iniciando. As tomadas d'água para geração localizam-se nessa camada anóxica. A água que escoava pelo vertedouro em salto de esquí, por outro lado, apresenta um alto nível de oxigenação.

Na época de estiagem, a camada profunda passa a contribuir de forma significativa na vazão efluente, visto que o vertimento diminui. Assim ocorreu na estiagem de 1985, sendo que medições de qualidade d'água efetuadas comprovaram a formação de dois fluxos diferenciados no rio Tocantins, em um trecho de mais de 10 km de extensão a jusante da barragem. O fluxo junto à margem direita, proveniente do vertedouro, possuía melhor qualidade, com teor de OD maior que 8 mg/l. O fluxo junto à margem esquerda, originário das turbinas, apresentou teores de OD próximos de zero em diversas ocasiões, com valores permanentemente inferiores a 2 mg/l. Portanto, confirmou-se que o teor de OD a jusante da barragem dependia grandemente da operação do vertedouro.

Durante os anos de 1986 e 1987 o monitoramento do reservatório de Tucuruí confirmou seu comportamento como monomítico quente, permanecendo estratificado por vários meses, de meados de abril a dezembro, e completamente misturado nos outros meses (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI; CALIJURI, 1993). Nas Figuras 4.3.62 e 4.3.63 a seguir tem-se o comportamento da temperatura e da concentração do OD no reservatório ao longo do ano, observando-se uma boa distribuição vertical da temperatura e do teor de OD, especialmente nos meses de março e abril, que coincidiram com os meses de maiores defluências pelo vertedouro, conforme a Figura 4.3.64, comprovando a ocorrência de grandes turbulências e mistura do reservatório por advecção, no período.

Por se situar numa zona equatorial, a temperatura d'água na superfície do reservatório varia muito pouco ao longo do ano, com média anual de 29,87°C e amplitude entre 28,5 °C (maio) e 30,6 °C (novembro). O gradiente térmico médio entre a superfície e o fundo do reservatório é de 1,27°C, medido em 1986 (HENRY, 1999).

Temperatura em °C

Figura 4.3.62 – Estratificação Térmica Vertical no Reservatório de Tucuruí

Fonte: TUNDISI et al, 1993

Teor de OD em mg/l

Figura 4.3.63 – Concentração de OD no Reservatório de Tucuruí

Fonte: TUNDISI et al, 1993

Figura 4.3.64 – Variação na Vazão Efluente do Reservatório de Tucuruí

Fonte: TUNDISI et al, 1993

A Tabela 4.3.29 a seguir mostra a comparação entre os principais parâmetros limnológicos obtidos para Tucuruí durante as fases rio, enchimento e reservatório.

Tabela 4.3.29 – Parâmetros Limnológicos no Reservatório de Tucuruí

Fases	Rio			Enchimento			Reservatório		
Parâmetros	min.	med.	máx.	min.	med.	máx.	min.	med.	máx.
Temperatura	28,8	29,4	30,0	24,4	27,6	30,8	28,6	29,30	30,0
Oxigênio (mg/l)	5,8	6,9	7,9	0,4	3,75	7,1	2,1	4,60	7,1
pH	6,6	6,9	7,2	6,8	7,15	7,5	6,5	6,80	7,1
Condutividade (μS/cm)	25,0	36,8	48,6	38,0	46,5	55,0	21,2	46,80	72,4
N-NO ₃ ⁻ (μg/l)	2,6	28,65	54,7	6,7	47,35	88,0	7,8	25,90	44,0
N-NH ₄ ⁺ (μg/l)	1,0	10,55	20,1	0,0	88,95	177,9	16,7	245,15	473,6
P-PO ₄ ³⁻ (μg/l)	1,4	4,9	8,4	5,8	28,4	51,0	3,1	20,45	37,8
Na ⁺ (mg/l)	1,5	2,35	3,2	0,3	1,10	1,9	0,9	1,70	2,5
K ⁺ (mg/l)	0,7	1,10	1,5	0,2	0,75	1,3	0,8	1,15	1,5
Mg ⁺⁺ (mg/l)	1,6	2,35	3,1	0,7	1,40	2,1	0,1	1,35	2,6
Ca ⁺⁺ (mg/l)	2,0	4,05	6,1	2,8	4,25	5,7	0,2	3,05	5,9
Fe ₃ ⁺ (mg/l)	0,5	1,65	2,8	< 0,01	0,115	0,2	0,05	1,86	3,7
Clorofila (μg/l)	6,2	10,05	13,9	1,1	4,30	7,5	1,0	8,00	15,0
Transparência (m)	0,2	0,85	1,5	0,4	4,35	8,3	0,3	3,85	7,4

Fonte: ELETRONORTE, 1988

Os cinco pontos de coleta de amostras se localizaram no rio Tocantins, um a jusante da barragem e os outros quatro a montante, entre a barragem e a foz do Araguaia. A fase rio foi monitorada entre outubro de 1980 e setembro de 1984. A fase enchimento entre 06/09/1984 e 30/05/1985 e a fase reservatório a partir de junho de 1985.

Conforme se pode observar, apesar da temperatura ter se mantido praticamente inalterada, houve redução na concentração de oxigênio, aumento na condutividade, aumento sensível na concentração de nutrientes, nitrogênio e fósforo, nas formas de amônia e fosfato, e na transparência da água. Com base nos parâmetros apresentados, principalmente no fósforo, poder-se ia concluir, segundo o critério da EPA (4.3.4.3e) que Tucuruí é eutrófico, mas esse quadro correspondeu a um período específico, que se estabilizou após a decomposição da floresta inundada.

– Paraibuna/Paraitinga

Em 1979 foi efetuada uma pesquisa em diversos reservatórios do Estado de São Paulo, que incluiu o de Paraibuna. Esse reservatório é altamente dendrítico e foi formado pelo barramento de dois rios, Paraibuna e Paraitinga, próximo à sua junção para formar o rio Paraíba do Sul. O reservatório Paraitinga é mais profundo, com uma altura de quase 90 m e o reservatório Paraibuna é cerca de 10 m mais raso. A cota da crista das barragens é 719 m, o NA normal é 714 m, que é a cota da soleira do vertedouro tulipa, o NA mínimo é de 694,60 m e a cota da tomada d'água é 690 m (BCOLD, 1982).

O propósito básico desses reservatórios era regularizar os escoamentos dos rios Paraibuna e Paraitinga, de modo a atender a demanda do Vale do Paraíba, possibilitando adicionalmente a geração de energia hidrelétrica no Paraibuna, o controle das cheias ao longo do Vale e a implementação da UHE Santa Branca, da Eletropaulo. A tomada d'água se localiza na barragem Paraibuna e o vertedouro tulipa se localiza na barragem de Paraitinga. As barragens foram concluídas em 1975 e o NA de 710 m foi atingido em 1978.

Na ocasião daquela pesquisa (1979) o reservatório foi classificado como monomítico quente. Novos registros de temperatura, OD e condutividade elétrica

efetuados na sequência, em 1980 e 1981, mostraram um padrão de circulação mais complexo e peculiar (FROEHLICH; ARCIFA, 1984). Nesse período os reservatórios apresentaram-se estratificados, com um termoclina entre as profundidades de 13 a 20 m, com temperaturas estáveis no fundo e mais baixas no reservatório mais profundo, o Paraitinga. Houve mistura completa nesses reservatórios nos invernos dos anos 1979 e 1981, acompanhada de decréscimo na transparência dos lagos, devido à ressuspensão dos sedimentos do fundo. Não ocorreu mistura em 1980 e, aparentemente, também não ocorreu em 1982, já que a ressuspensão dos sedimentos não foi observada.

A cada mistura, a temperatura do fundo dos reservatórios diminuiu cerca de 1°C. Considerando-se que os reservatórios eram recentes naquela ocasião, pode-se dizer que existia uma tendência clara de que as temperaturas do fundo abaixassem mais, a cada inverno rigoroso, mantendo a estratificação da coluna d'água nos anos de invernos mais amenos, ou seja, existia a tendência de que os reservatórios passassem longos períodos sem misturar as camadas. Portanto, com comportamento de lago oligomítico e não de monomítico quente.

A concentração de OD nos dois reservatórios mostrou que a mistura completa das camadas ocorreu apenas no ano de 1979 no reservatório de Paraibuna, o mais raso, enquanto que nesse ano no Paraitinga, e em ambos os reservatórios no inverno de 1981, a concentração de OD aumentou no fundo e permaneceu nula em uma camada intermediária, situada entre 30 e 50 m de profundidade. Esse comportamento foi explicado pelo efeito dos ventos, que movimentaram as camadas superficiais, mais frias e com OD, até as margens e aí ocorreu um mergulho dessas camadas em direção ao fundo.

Quanto à condutividade elétrica, registraram-se valores crescentes com a profundidade e com a duração da estratificação. Durante as misturas incompletas, os valores da condutividade na camada anóxica intermediária foram muito altos.

4.3.4.5 – Comentários

Os dois processos apresentados – Eutrofização e Estratificação Térmica – têm origens diversas, sendo que a Eutrofização é consequência da decomposição da vegetação inundada ou de um pulso de nutrientes, principalmente fósforo, afluindo ao reservatório, proveniente de fonte externa, enquanto que na Estratificação Térmica ocorre o resfriamento do fundo do reservatório em relação à superfície. Mas as consequências são as mesmas nos dois processos: o fundo do reservatório se torna anóxico, consumidor de oxigênio, com o predomínio de bactérias anaeróbicas e facultativas, que liberam gás carbônico, metano, gás sulfídrico, amônia, além de fosfatos, ferro e manganês, que se encontravam no sedimento do fundo, alterando as condições químicas da água, como o pH, por exemplo. A camada superficial passa a ser a zona produtora de oxigênio, com a diferença que a camada superficial de um reservatório eutrófico é muito mais estreita que de um estratificado.

Em ambos os casos a qualidade da água do fundo do reservatório se torna ruim, tanto para uso consuntivo quanto para outros usos, afetando o trecho a jusante do barramento, caso a tomada d'água se localize nessa camada.

Os fatores determinantes para alteração da qualidade da água do reservatório são:

- o tempo de residência, sendo que, mesmo que esse tempo seja curto no corpo principal do reservatório, uma morfometria recortada pode conduzir a tempos de detenção maiores nos segmentos laterais, resultando em qualidade da água mais crítica nesses locais;
- a existência de vegetação abundante, sendo que nos braços do reservatório, próximo a foz de tributários, onde a profundidade média é reduzida e a vegetação mais abundante, pode ocorrer um incremento da produção primária, proliferação de macrófitas aquáticas e invertebrados de interesse médico sanitário, incluindo-se hospedeiros intermediários, vetores de doenças e aqueles causadores de incômodos. Esse impacto ocorre, em geral, no enchimento e início da operação do reservatório, quando se tem degradação mais intensa da vegetação;

- flutuações de níveis d'água decorrentes da operação do reservatório, que deixam expostas extensas áreas de sedimentos com vegetação em decomposição e que representam uma rápida fonte adicional de nutrientes após nova inundação. Além das modificações na dinâmica de nutrientes, deve ser também considerada a perda de organismos bentônicos, a formação de áreas alagadas, que permanecerão isoladas do reservatório durante o período de maior deplecionamento, propiciando o desenvolvimento de macrófitas aquáticas e de vetores de veiculação hídrica, fato este extremamente negativo, principalmente nas áreas situadas nas proximidades de centros urbanos.
- profundidade média do reservatório, também relacionada à morfometria, que pode levar à estratificação térmica do reservatório;
- lançamento de esgotos domésticos ou efluentes industriais no reservatório;
- existência de outros barramentos a montante da área em estudo, que faz com que as condições limnológicas do sistema localizado a jusante dependa, em parte, das condições verificadas nos reservatórios de montante. As características das águas dependerão também das regras operativas que serão adotadas por esses reservatórios.

Esses impactos ocorrem, em geral, durante o enchimento do reservatório e logo após, são negativos, certos, limitados à área do reservatório, permanentes e irreversíveis, de grande magnitude e alta relevância.

Quanto às alterações nas características da água a jusante, elas se darão a partir do início da construção da barragem e serão causadas por:

- movimentação de terras na área das obras, quer seja pelas aberturas de vias de acesso como pela própria obra em si, que proporcionará um maior aporte de partículas sólidas, ocasionando um aumento de turbidez na água. Essa modificação, no entanto, pode ser considerada de pequena magnitude, temporária e de alcance espacial localizado;

- aporte de substâncias poluidoras ao meio aquático provenientes das atividades do Canteiro de Obras, como, por exemplo, óleos e graxas e resíduos de origem antrópica (lixo, esgoto, etc);
- redução da vazão a jusante, durante o enchimento do reservatório. É provável também que o trecho a jusante sofra, durante o enchimento, uma redução nos teores de oxigênio dissolvido devido ao recebimento de águas menos oxigenadas, com maiores teores de matéria orgânica, provenientes da área do reservatório;
- após o enchimento, as alterações na qualidade da água de jusante estarão relacionadas às características das águas de montante, às regras operativas da usina e às características da barragem como por exemplo, altura da tomada d'água, posicionamento dos vertedouros e da Casa de Força, etc, bem como a existência de afluentes do rio a jusante. O trecho imediatamente abaixo da barragem poderá apresentar maior transparência da água, devido à sedimentação de partículas sólidas no reservatório, e maior concentração de organismos planctônicos, provenientes do reservatório.

Os impactos na qualidade da água de jusante podem ser considerados permanentes e irreversíveis. A magnitude e o grau de relevância dependerão das características mencionadas.

4.4 – Hierarquia dos Impactos

4.4.1 – Metodologia

Após a avaliação e o agrupamento dos impactos mais significativos sobre os ecossistemas e a sociedade, a hierarquização segundo sua relevância constitui uma síntese que subsidia a previsão dos programas de mitigação e compensação e as conclusões sobre a viabilidade ambiental do empreendimento.

Para tanto, é, em geral, utilizado o método "ad hoc", também conhecido como Reunião de Especialistas. O método e os seus resultados são subjetivos; para minimizar este aspecto, os impactos são classificados em patamares ou níveis de relevância.

A equipe multidisciplinar é integrada pelos seguintes profissionais das diferentes disciplinas que participaram dos estudos: 1 Biólogo, Biota Terrestre; 1 Biólogo, Fauna Aquática e Limnologia; 1 Geólogo, Geologia/Recursos Minerais/Geotecnia; 1 Geógrafo, Geomorfologia; 1 Engenheiro Civil, Hidrologia e Climatologia; 1 Engenheiro Civil, Equipe do Projeto; 1 Engenheiro Agrônomo, Pedologia/Uso e Ocupação das Terras; 1 Engenheiro Civil, Coordenador do Estudo Ambiental; 1 Economista, Sócio Economia; 1 Historiador ou Sociólogo.

Após apresentação dos impactos e discussão com todos os integrantes, é consensada uma listagem-resumo dos impactos positivos e negativos mais significativos, agrupando impactos afins, para facilitar o julgamento e a apresentação. A seguir, esses impactos são classificados em dois níveis, conforme o exemplo hipotético apresentado na sequência.

4.4.2 – Impactos Destacados como os Mais Relevantes

- Deslocamento involuntário da população rural e da população urbana pela formação do reservatório. Em função do número de famílias da área rural e de famílias dos núcleos urbanos dos municípios atingidos, que serão deslocados, com as consequências econômicas e sociais inerentes para os afetados, pode se configurar como o maior impacto a ser provocado pelo aproveitamento.
- Transtornos aos habitantes dos núcleos vizinhos à obra pelo aumento de população e de atividade durante a construção, incluindo aumento da demanda de serviços públicos e impacto na saúde pública. Este impacto estará acompanhado necessariamente por impactos positivos, como o aumento da atividade econômica.

A consideração deste impacto temporário no destaque dos mais significativos será função do tamanho da população atraída pelo empreendimento (empregos diretos mais a população total atraída), quando comparada com a população dos núcleos mais próximos da barragem.

4.4.3 – Impactos Destacados como Relevantes

- Perda de terras pela formação do reservatório.
- Melhoria da qualidade de vida da população da região e possibilidade de desenvolvimento econômico (indústrias, agricultura tecnificada), pela maior disponibilidade de energia elétrica.
- Alteração do mercado de trabalho e geração de renda, pela construção da obra.
- Perda e fragmentação de habitats naturais, com redução de populações vegetais e animais, que significará redução regional da biodiversidade ou erosão genética.
- Alterações das comunidades de peixes, tanto no reservatório como no rio a jusante da barragem.
- Perdas das atividades econômicas e do lazer da população associados às praias fluviais do rio, pelo seu desaparecimento no estirão do reservatório.
- Instabilização das encostas marginais em alguns trechos do reservatório, pelo enchimento do mesmo, pelas ondas provocadas por ventos e pela variação do nível d'água devida à operação.
- Aumento das receitas orçamentárias dos municípios, durante a construção das obras e no futuro, como compensação financeira pela inundação de território.
- Interrupção de ligações viárias, pela submersão de pontes e estradas.
- Formação de áreas úmidas e alagadiças nas margens do reservatório, pela subida do lençol freático, e no trecho do reservatório sujeito a variação de nível d'água, às vezes trazendo consequências estéticas e sanitárias desfavoráveis nas proximidades das cidades.
- Perda do potencial de exploração de cascalho, areia e, principalmente, argilas, que podem ser matéria prima de indústria cerâmica regional e local.

- Deterioração da qualidade da água nos braços laterais e nas áreas rasas do reservatório, agravada pela variação do nível d'água.

Os programas ambientais destinados a mitigar e compensar os impactos destacados como relevantes deverão receber maior atenção e, em princípio, mais recursos.

CAPÍTULO 5 – POSSÍVEIS SOLUÇÕES E MEDIDAS PARA ATENUAR OS IMPACTOS FÍSICOS DE BARRAGENS

Nesse capítulo são apresentadas possíveis soluções para evitar ou minimizar os impactos no Meio Físico, decorrentes da construção de barragens e enchimento de reservatórios. Para alguns dos impactos, como a perda do potencial agrícola das terras submersas pelo reservatório, não existem medidas atenuantes. Para outros, as medidas são basicamente restritas ao monitoramento, ao acompanhamento da sua evolução do tempo e no espaço.

As alternativas de solução que remetem a Aspectos Legais e Institucionais (ver Apêndice) são específicas do Brasil, enquanto as eminentemente técnicas são comuns a outros países.

5.1 – Fase de Planejamento – Estudo de Alternativas Locacionais para a Barragem

As soluções e medidas para atenuar os impactos de barragens devem ser analisadas desde a fase inicial, de estudo de alternativas locacionais. Esse estudo envolve vários aspectos, sendo os mais importantes aqueles relacionados com a bacia hidrográfica, os impactos ambientais, a escolha de eixos e o mercado. No caso de barragens para geração, é necessário consultar os Estudos de Inventário Hidrelétrico das Bacias Hidrográficas, que estabelecem os aproveitamentos mais convenientes para o potencial do rio, e constituem as bases para definição da alternativa locacional das usinas hidrelétricas.

Nos Estudos de Inventário é definida a cascata de aproveitamentos a serem implantados no rio, as cotas dos níveis d'água dos reservatórios, a posição dos eixos e o desnível em cada aproveitamento, resultando a divisão de queda do rio.

Para se comparar as alternativas de divisão de quedas do rio, deve-se analisar índices de custo-benefício energético e índices ambientais. O primeiro índice leva em conta os custos de construção e a energia agregada ao sistema elétrico brasileiro. O segundo índice considera seis Componentes-Síntese do meio ambiente: ecossistemas terrestres, ecossistemas aquáticos, base econômica, modos de vida, organização territorial e população indígena. A cada um dos dois índices, de custo-benefício

energético e ambiental é estabelecido um peso, por exemplo: 0,50/0,50 ou 0,60/0,40, para permitir a comparação entre as alternativas. Ou então os índices são analisados através de representação gráfica (ELETROBRÁS, 1997). A seguir apresenta-se o resumo das atividades que constam de um Estudo de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas:

- Identificação de locais barráveis
- Formulação de alternativas de divisão da queda disponível ao longo do rio
- Elaboração dos Ante-Projetos das Barragens: Projetos, Quantidades e Orçamentos (custos)
- Elaboração dos Estudos Ambientais: Custos e Índices Ambientais (IA)
- Elaboração dos Estudos Energéticos (Benefícios) e dos Índices de Custo-Benefício econômico (ICB)
- Índice de Mérito $I = PE \times ICB + PA \times IA$
 - PE: peso do componente econômico
 - PA: peso do componente ambiental

Os Índices Ambientais representam a parte dos impactos que não são mitigados ou compensados economicamente.

A tendência em estudos desse tipo, especialmente em áreas razoavelmente habitadas, é que a cascata com maior número de aproveitamentos e menor desnível em cada um, resulte mais favorável que outra com poucos aproveitamentos e grandes desníveis e que inunda áreas muito extensas.

A seguir apresenta-se um exemplo hipotético de duas alternativas, a primeira (A), com uma barragem alta, e a segunda com duas barragens (B e C), de menor altura e cujos eixos foram implantados em locais ambientalmente mais favoráveis, conforme Figuras 5.1.1 e 5.1.2 e Tabela 5.1.1 a seguir.

Figura 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”

Fonte: JENSEN, 2002

TABELA DE VALORES TÍPICOS				
APROVEITAMENTO	A	B	C	ALTERNATIVA B + C
ÁREA INUNDADA	100	15	15	30
POPULAÇÃO RURAL	100	15	15	30
RELOCAÇÃO DE CIDADES	2	—	—	—
POPULAÇÃO URBANA	100	—	—	—
PRODUÇÃO DE ENERGIA	100	50	40	90

Figura 5.1.2 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”
 Fonte: JENSEN, 2002

Tabela 5.1.1 – Aproveitamento “A” comparado com Alternativa “B+C”

TABELA DE VALORES TÍPICOS				
APROVEITAMENTO	A	B	C	ALTERNATIVA (B + C)
Custo de Construção	100	60	50	110
Custo Ambiental	20	2	2	4
Custo Total	120	62	52	114
Produção de Energia	100	50	40	90
Índice Custo/Benefício	1,20	1,24	1,30	1,27

Fonte: JENSEN, 2002

Nas etapas seguintes dos estudos, como Estudos de Viabilidade, a posição do eixo do aproveitamento em questão é otimizada, considerando as características geológicas e topográficas de algumas alternativas nas imediações e suas conseqüências sobre os custos das obras. Nessa fase são avaliados, com maior detalhe, os impactos ambientais de cada alternativa, escolhendo-se a solução técnico-econômica-ambiental mais favorável.

Assim, são analisadas: a extensão de área inundada, centros urbanos afetados, população rural e urbana a ser reassentada, interferência em áreas indígenas, grau de conservação da vegetação inundada, riscos de comprometimento da qualidade da água do futuro reservatório, em função da profundidade do lago, tempo de residência da água e vegetação inundada, infra-estrutura afetada, como estradas, pontes, etc, atividade econômica principal na área, locais de interesse turístico prejudicados, etc.

Essas considerações sobre alternativas locais podem ser estendidas para barragens de qualquer outra finalidade.

Escolhido o eixo do barramento que apresenta a melhor combinação de índices de custo benefício e impacto no meio ambiente, inicia-se o estudo do arranjo das obras, que também é determinante para a ocorrência de maiores ou menores impactos no meio ambiente. Assim, a posição da Casa de Força, do Vertedouro de Superfície, dos Sistemas de Transposição para Navegação (Eclusa) e para os peixes

(Escada/Elevador), a cota da Tomada d'Água, etc, deverão ser estudados, de forma a garantir o melhor desempenho da obra.

A qualidade da água do reservatório e da que será lançada a jusante depende da cota da tomada d'água e da possibilidade de oxigenação a jusante. A eficiência da escada de peixe depende da velocidade do escoamento a jusante, nas imediações da sua entrada, etc.

Após a fase de planejamento detalhado da obra, restarão os impactos inevitáveis, para os quais serão adotadas medidas mitigadoras ou compensatórias. Serão também instituídos programas de monitoramento da evolução dos impactos, para, a partir da análise dos dados coletados, serem propostas medidas para atenuar ou compensar os efeitos e verificar a eficácia das medidas de mitigação. A seguir são listados os programas de monitoramento e as medidas para atenuar alguns dos impactos físicos de barragens. Conforme já mencionado, algumas dessas medidas são específicas para as condições brasileiras, especialmente as que se referem a tipos de solo, vegetação e clima, bem como as regidas pela legislação.

5.2 – Possíveis Soluções e Medidas Aplicáveis

5.2.1 – Clima

5.2.1.1 – Monitoramento do Clima Local

a) Introdução

A criação do espelho d'água propicia alterações em alguns parâmetros meteorológicos, destacando-se a umidade relativa, ventos, nevoeiros, etc, alterando, dessa forma, o clima no entorno do reservatório.

b) Objetivo

O objetivo de um programa de monitoramento do clima é detectar possíveis alterações, tanto espaciais como temporais, nos parâmetros meteorológicos após a formação do reservatório.

A partir do conhecimento dos parâmetros meteorológicos nas fases antes e após o lago, será possível identificar os efeitos da implantação do empreendimento, indicando possíveis medidas mitigadoras, além de se ampliar o conhecimento sobre o assunto, o que poderá ser de grande utilidade para futuros projetos.

c) Ações

O monitoramento climático deve incluir os seguintes elementos:

- Precipitação
- Temperatura do ar
- Intensidade e direção dos ventos
- Evaporação
- Umidade Relativa do ar
- Pressão atmosférica
- Horas de Insolação

Em princípio, os horários previstos para observação e coleta dos dados são: 09:00 h; 15:00 h e 21:00 h, de acordo com as recomendações da OMM - Organização Meteorológica Mundial. Caso julgado conveniente, poderá ser incluído o horário da 7:00 h, com vistas a atender à futura operação do empreendimento.

Contudo, como, em geral, tem sido instaladas estações automáticas, a periodicidade de varredura dos sensores pode ser estabelecida de acordo com as necessidades de leitura de cada parâmetro. Isso pode ser definido pelo usuário através do “software” utilizado para operação e gerenciamento da estação.

Deve-se prever a instalação de ao menos duas estações climatológicas automáticas, uma na barragem e a outra junto ao reservatório.

Caso exista, nas proximidades do reservatório, uma estação em área com características semelhantes, poderá ser automatizada para atender ao programa de monitoramento. Contudo, se a estação encontra-se localizada em área já

plenamente urbanizada, a utilização dos seus dados para realização de estudos climáticos fica inviabilizada, devido à influência de condições locais. Caso se disponha de estação antiga, com série extensa de dados coletados, será utilizada para avaliação das condições pré-lago.

Seguindo a tendência atual na aquisição de dados meteorológicos, as estações deverão ser automáticas, ou seja, contarão com sensores de última geração e registro contínuo de dados em meio digital (data logger). Cada estação deverá ser composta pelos seguintes equipamentos:

- Data logger e acessórios de comunicação;
- Sensores de velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, precipitação, evaporação e pressão atmosférica;
- Tripé meteorológico e acessórios.

Além desses equipamentos, será necessária a aquisição de “software” adequado e equipamento para transmissão dos dados coletados ao computador.

Caso se utilize, no monitoramento, mais alguma estação que não seja automática, essa deverá ser dotada dos seguintes instrumentos: pluviômetro, heliógrafo, pluviógrafo, termômetros de máxima e de mínima, anemômetro, anemógrafo, tanque evaporimétrico, psicrômetro, barômetro e barógrafo.

Após a coleta dos dados, os mesmos serão enviados à área de operação do empreendimento, para análise, consistência e processamento, sendo, a seguir, armazenados em um banco de dados.

Em termos de armazenamento digital, os dados climáticos a serem considerados serão os seguintes:

- totais diários de precipitação;
- temperaturas do ar médias, máximas e mínimas diárias;

- intensidade e direção dos ventos;
- totais mensais de evaporação;
- médias diárias de umidade relativa do ar;
- médias diárias de pressão atmosférica.

A partir do carregamento do banco de dados com os elementos anteriormente citados, será possível sistematizar as informações da seguinte forma:

- obtenção de parâmetros estatísticos como média, desvio padrão, valores máximos e mínimos, etc.
- criação de arquivos digitais de séries temporais, para utilização em estudos de análise de tendência.

Em resumo, os dados obtidos terão a finalidade de subsidiar estudos e pesquisas no âmbito da avaliação de impactos no clima no entorno do reservatório.

d) Responsável pela Implementação

Em termos de implantação e operação, a prática comum tem sido que a aquisição e implantação das estações fica a cargo do empreendedor, sendo que a operação, incluindo coleta dos dados, manutenção e a realização de estudos fica a cargo de um órgão climatológico, como o INEMET, ou de uma Universidade localizada na região. Para tanto, é necessária a celebração de um convênio estabelecendo as formas de atuação, responsabilidades, direitos, deveres, etc. entre as partes envolvidas.

Deve-se prever, também, uma equipe para manutenção e fiscalização das estações, equipe essa que, eventualmente, poderá também coletar os dados.

e) Cronograma

O monitoramento climatológico deverá se estender por, no mínimo, 2 anos inteiros após o enchimento do lago.

5.2.1.2 – Gases de Efeito Estufa

a) Introdução

Não existem atualmente medidas que minimizem, mitiguem ou compensem estes impactos. A remoção da vegetação antes da inundação do lago é uma alternativa para reduzir a emissão de metano. Já o gás carbônico é continuamente conduzido ao reservatório, proveniente da bacia hidrográfica, portanto não se consegue controlar o aporte ao reservatório.

Deve-se evitar a implantação de aproveitamentos hidrelétricos com baixa densidade de potência, que é a relação entre a potência e a área do reservatório, em MW/km². Conforme apresentado no item 4.3.1.2, as três hidrelétricas brasileiras de pior desempenho quanto à emissão de gases de efeito estufa, comparativamente à termelétricas de igual potência, são Balbina, Samuel e Três Marias, com densidades de 0,11/0,39 e 0,37 MW/km², respectivamente. Aproveitamentos com densidades de potência nessa faixa dificilmente seriam ambientalmente viáveis nos dias de hoje. Portanto, a emissão de gases de efeito estufa a partir de reservatórios é mais um argumento para se evitar soluções de baixa densidade de potência.

Para se conseguir avaliar o impacto do reservatório sobre as emissões de gases deve-se efetuar medições prévias, no habitat natural não alterado, e medições ao longo de diversos anos após o enchimento do lago.

Para maior precisão, as medições da emissão natural devem abranger toda a área direta e indiretamente afetada pela barragem, visto que a alteração do uso do solo induzida pelo deslocamento de pessoas, fontes de extração e outras atividades econômicas pode contribuir para alterar as emissões após a construção do reservatório.

Apresentam-se a seguir algumas orientações específicas para desmatamento e limpeza de reservatórios em áreas de vegetação de florestas, cerrados, campos cerrados, campos sujos, áreas úmidas e campos antrópicos, típicas das condições brasileiras.

O enchimento do lago inunda, em geral, áreas rurais e submerge formações ripárias, principalmente florestas, além de cerrados no Brasil Central, pastagens e agriculturas. Pode inundar também áreas urbanas, estruturas e edificações antrópicas e fontes de contaminação das águas.

É esperado um período de anoxia imediatamente após a formação do reservatório, decorrente da presença de matéria orgânica, que determina a elevação da DBO. A retirada da vegetação contribui, em parte, para reduzir a duração da anoxia, porém não elimina a ocorrência do fenômeno, já que a matéria orgânica está presente também no solo.

O desmatamento e limpeza de material vegetal é regulado por lei federal, nos casos de áreas a serem inundadas por açudes, represas ou lagos artificiais. A recomendação é que se faça o desmatamento e limpeza integrais da área, porém, nos reservatórios grandes, a prática tem mostrado que é suficiente o desmatamento parcial e seletivo.

b) Objetivos

O desmatamento e limpeza do futuro reservatório têm por objetivo mitigar os potenciais impactos ambientais negativos decorrentes da inundação, e assim:

- reduzir a produção de gases de efeito estufa;
- reduzir a eutrofização cultural do reservatório;
- induzir a movimentação prévia e gradual da fauna terrestre para fora de área a ser inundada;
- eliminar potenciais focos de contaminação das águas por organismos patogênicos;
- eliminar obstáculos que possam limitar o uso múltiplo do reservatório, ou colocar em risco a segurança dos usuários;

- evitar a formação de “paliteiros”, que comprometem a valorização cênica da paisagem;
- promover o aproveitamento racional do material lenhoso presente na área a ser inundada.

c) Ações

De maneira geral as formações florestais (floresta de galeria, formações aluviais e de terraços) devem ser objeto de desmatamento obrigatório, por possuírem maior potencial de causar os impactos mencionados. Isso se deve ao fato que a fitomassa proveniente dessas formações é composta por elevada quantidade de folhas, galhos, serrapilheira e casca, componentes esses que têm maior velocidade de decomposição e consomem mais oxigênio, comprometendo a qualidade da água e aumentando a emissão de metano.

No caso de reservatórios que operam com deplecionamento, a faixa exposta entre os níveis máximo e mínimo deverá ser totalmente desmatada, removendo-se todo tipo de vegetação, para reduzir o risco de rebrota quando o NA estiver baixo.

Os corredores de dispersão da fauna, constituídos pelos remanescentes florestais significativos que se estendam para fora dos limites da área a ser alagada, devem ser objeto de desmatamento sistemático e gradual, a ser efetuado da calha do rio em direção às margens e, de preferência, de jusante para montante, afungentado aos poucos os animais ali presentes.

Deverão ser conservados alguns ambientes florestais limítrofes ao reservatório, a partir de sua borda interna, mantendo-se uma pequena faixa ligeiramente imersa (cerca de 2 m abaixo do NA normal). Esse procedimento propiciará ambientes para o abrigo e a procriação de espécies da fauna aquática e semi-aquática, que constituirão áreas de recolonização.

A preocupação com o corte da vegetação arbórea deverá ser maior próximo às áreas urbanas, bem como nas proximidades da barragem, a fim de evitar a

formação de paliteiros, assim como a proliferação de invertebrados (patogênicos ou causadores de incômodo) e macrófitas aquáticas.

Caso a área a ser inundada apresente remanescentes naturais de interesse para a pesquisa de flora e fauna, essas áreas deverão ser poupadas do desmatamento até um ano antes do enchimento, ainda que haja interesse para o aproveitamento de lenha ou madeira. Ressalta-se, nesse caso, a necessidade de fiscalização que garanta essa preservação. Observa-se, no entanto, que, à medida em que terminarem os estudos do programa de pesquisa, estas áreas poderão ser liberadas para desmatamento. Assim, dependendo da localidade, este prazo poderá ser alterado, permitindo-se o desmatamento até um ano e meio antes do enchimento.

Os estudos de desmatamento devem englobar uma estimativa de quantidade do material lenhoso da área a ser inundada, separadamente para as áreas de desmatamento obrigatório e não obrigatório.

Em função do tipo de material lenhoso existente, deverão ser identificadas as utilizações possíveis desse material, por exemplo: em serrarias, na produção de lenha ou de carvão para fins energéticos, etc.

– Trabalhos de Desmatamento

- Conscientização dos proprietários e população lindeira

Os proprietários das áreas lindeiras ao reservatório, assim como os moradores locais, deverão ser informados da possibilidade de exploração da madeira existente na área a ser inundada.

- Etapas de Desmatamento

Num primeiro momento (até um ano antes do enchimento) serão liberadas para corte apenas as áreas permitidas pelo Código Florestal, ou seja, deverão ser mantidas as áreas de preservação permanente e as reservas legais, observando-se que essas deverão abranger, quando existentes, remanescentes localizados acima da cota de inundaço. No caso dos remanescentes naturais

situarem-se abaixo da cota de inundação será mantido um compromisso de preservar a reserva legal até um ano antes do enchimento.

A reserva legal varia de acordo com o tipo de vegetação e a região (MP 2.166-67, 2001). Nas propriedades rurais situadas em áreas de florestas na Amazônia Legal devem ser mantidas 80% da vegetação. Nas propriedades rurais situadas em cerrados na Amazônia Legal devem ser mantidos 35%, podendo ser 20% na propriedade rural e 15% em outra área da mesma microbacia. Para propriedades rurais situadas em áreas de florestas ou outras formas de vegetação nativa nas demais regiões do país, e situadas em áreas de campos gerais em qualquer região, devem ser mantidos 20% da vegetação original.

Denomina-se Amazônia Legal à região formada pelos Estados do Acre, Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia, Amapá e Mato Grosso e as regiões situadas ao Norte do paralelo 13° S dos Estados de Tocantins e Goiás e a Oeste do meridiano 44° W do Estado do Maranhão.

- **Demarcação da cota de inundação em campo**

A demarcação em campo da área a ser inundada possibilitará a execução dos procedimentos de licença para desmatamento, bem como a fiscalização de sua execução. Os marcos deverão ser de fácil visualização e os moradores locais informados de sua localização.

- **Cadastro**

A elaboração do cadastro de proprietários das áreas inundadas e lindeiras deverá conter, entre as informações coletadas, dados relativos aos remanescentes florestais existentes na propriedade, o percentual que permanecerá abaixo da cota de inundação, bem como sobre o possível interesse do proprietário em explorar esses remanescentes com seus próprios recursos.

Paralelamente deverão ser levantados, pelo empreendedor, as empresas e instituições interessadas na exploração de madeira e lenha, como por exemplo: serrarias, olarias, etc.

Os dados obtidos no cadastro deverão ser encaminhados ao IBAMA ou órgão ambiental competente.

- Licença para desmatamento

A licença de desmatamento deverá ser emitida pelo IBAMA conforme a legislação vigente.

No caso de não haver interesse por parte do proprietário na exploração da madeira, esta exploração poderá ser realizada por empresas previamente cadastradas. O cadastro dessas empresas poderá facilitar a articulação entre proprietário/IBAMA/empresa, de forma a tornar mais ágil o processo de exploração.

- Técnicas de desmatamento

Dentre as técnicas de desmatamento recomendadas, em função do tipo de vegetação e do destino que se pretende para o material extraído, tem-se:

Cerrados e campos cerrados: corte manual com moto-serra;

Formações florestais: nesse caso a madeira de importância econômica é selecionada e extraída, a seguir é feito o desmatamento e enleiramento com trator de esteira provido de lâmina e, por fim, os resíduos são retirados e colocados em áreas de bota-fora ou queimados e enterrados.

A exploração florestal comercial é uma operação complexa, que exige muito planejamento e organização das operações para não se transformar em devastação. O sistema de exploração deve ser a derrubada seletiva de um número reduzido de espécies por unidade de área e de forma itinerante. Sua execução deve seguir uma orientação denominada “espinha de peixe”, cujo

objetivo é atender as necessidades de produtividade do arraste e evitar maiores danos às árvores remanescentes.

Costuma-se chamar de corte às operações de derrubada, desgalhamento, picagem e preparo da madeira para o transporte, sendo que vários fatores devem ser considerados no planejamento desta operação, ressaltando-se que o tempo de corte é função do diâmetro da árvore, espécies exploradas, tipo de ferramenta utilizada e constituição da equipe.

Se as árvores são cortadas sem a preocupação de uso final, muitos valores são perdidos e há o comprometimento das demais etapas de exploração, com conseqüências diretas nos custos.

Na derrubada de árvores deve-se atentar para as seguintes etapas: deslocamento do operador até a árvore, com o planejamento da rota de trabalho, limpeza ou preparo para a derrubada, planejamento prévio da queda, corte ou derrubada propriamente dito.

O desgalhamento consiste em remover sistematicamente os galhos e o ponteiro de uma árvore derrubada, definindo-se assim o fuste comercial aproveitável. A operação de desgalhamento usualmente é feita no local onde a árvore é abatida, e pode ser feita com machado, facão e moto-serra.

A picagem, traçamento ou toragem é o processo onde as árvores abatidas e desgalhadas são cortadas em toretes, como forma de preparo para o transporte e posterior aproveitamento na indústria.

Enquanto o corte das árvores é feito, via de regra, por moto-serras, a extração ou arraste de madeira para fora da mata é uma atividade geralmente desenvolvida pelo trator florestal.

A existência de uma rede de estradas, abrangendo desde estradas permanentes até picadas de arraste dentro da mata, a fim de proporcionar o transporte de madeira explorada até os pátios de estocagem, os centros de consumo e/ou

distribuição, é essencial para o aproveitamento do produto das florestas, e pode significar, quando não adequada, num aumento de custo considerável.

Os pátios de estocagem na mata são áreas preparadas na floresta com a função de estocar as toras extraídas e cuja preparação depende do método e equipamentos a serem utilizados no carregamento dos caminhões, destacando-se que uma boa drenagem e a limpeza dos pátios é fundamental.

- Fiscalização

A fiscalização do desmatamento será de responsabilidade do IBAMA, podendo ser firmado um convênio, segundo o qual o empreendedor fornecerá os veículos e combustível necessário à execução dos trabalhos.

- Indenizações

No caso de áreas consideradas refúgios de fauna e/ou áreas de pesquisa a serem mantidas acima da cota de inundação poderá ser estudada a possibilidade de indenização, por parte do empreendedor.

- Limpeza do Reservatório

A demolição e/ou retirada de edificações, postes, estradas e demais construções de origem antrópica não visa reduzir a produção de gases de efeito estufa, mas remover obstáculos físicos que possam interferir com rotas de navegação, com a operação da Usina, nas proximidades da Casa de Força e/ou do vertedouro, e com atividades de lazer e pesca. As construções serão removidas até as fundações, sendo o material resultante depositado em depressões do terreno ou removido para fora da área de inundação.

- Neutralização e/ou desinfecção da área de inundação

Já a neutralização e/ou desinfecção de possíveis fontes de contaminação das águas do futuro reservatório é uma atividade importante para o controle das emissões de gases de efeito estufa e da qualidade da água do futuro reservatório,

por representarem fontes de carbono. Essas construções englobam fossas domésticas, currais, pocilgas, galinheiros e depósitos de lixo existentes na área de inundação.

No caso de currais, pocilgas e galinheiros deverá ser feita a retirada ou aterramento dos detritos orgânicos e a posterior cobertura da área infectada com cal virgem, na proporção de 10 kg/m². Nas fossas será lançada cal virgem, na proporção de 60 kg/m³ de fossa, com posterior aterramento. Nos depósitos de lixo será realizada uma queima, sendo que os resíduos dessa queima deverão ser retirados da área de inundação e depositados em área regularizada ambientalmente.

Deve-se tomar cuidado para garantir também a retirada de todos os produtos químicos, agrotóxicos, óleos e combustíveis existentes na área de inundação.

d) Responsável pela Implementação

As ações obrigatórias mencionadas deverão ficar a cargo do Empreendedor. Formações do tipo cerrado poderão ser ou não removidas da área a ser inundada. Nesse caso, o Empreendedor poderá incentivar o aproveitamento lenhoso por terceiros, através da divulgação e doação aos consumidores potenciais, como moradores locais, proprietários de áreas lindeiras e outros.

e) Cronograma

O desmatamento, em geral, se inicia entre um ano e um ano e meio antes do enchimento do reservatório, para reduzir o risco de rebrota. Antes desse prazo somente será possível o desmatamento nos locais que não constituam áreas de preservação permanente ou reserva legal, corredores de dispersão da fauna e áreas utilizadas para pesquisa.

No prazo de um ano até o início do enchimento, o IBAMA deverá liberar as áreas restantes para o desmatamento. A partir dessas data, durante o período de um ano, será efetuado o desmatamento das áreas críticas, sob a responsabilidade e/ou acompanhamento do empreendedor.

Essas áreas abrangerão, provavelmente, aquelas de difícil acesso e/ou exploração (por exemplo as matas paludosas), áreas utilizadas para pesquisa, áreas de preservação permanente ou reserva legal e corredores de fauna.

Seis meses antes do enchimento, constatando-se a necessidade, será realizado o controle de rebrota pelo empreendedor.

5.2.2 – Recursos Hídricos

5.2.2.1 – Monitoramento de Níveis d'Água a Jusante e a Montante da Barragem

a) Introdução

O monitoramento dos níveis d'água tem por finalidade avaliar as variações, tanto espaciais como temporais, que ocorrerão a jusante da barragem e ao longo do reservatório e dos principais afluentes que contribuem diretamente ao lago.

O monitoramento permitirá acompanhar a variação dos níveis d'água a jusante da barragem devido à operação da usina e obter uma avaliação detalhada da superfície inundada a montante, onde, devido aos efeitos de remanso no reservatório, verifica-se uma variabilidade nas superfícies de inundação, em função das condições de escoamento, ou seja: das vazões afluentes e do nível d'água na barragem. Durante a fase de operação, esse monitoramento será de vital importância para a determinação precisa das áreas inundadas e avaliação dos volumes do reservatório.

b) Objetivo

O objetivo do monitoramento é permitir uma avaliação mais precisa da superfície inundada, nas extremidades do reservatório sujeitas aos efeitos de remanso, e da variação dos NAs a jusante da barragem, devida à operação da Usina.

c) Ações

Para acompanhamento da variação dos níveis d'água, prevê-se a instalação de dois limnigrafos junto à barragem, um a montante e outro a jusante, e réguas

limnimétricas ao longo do reservatório e nos vales dos principais afluentes. Em geral, procura-se aproveitar os postos instalados nas etapas iniciais dos estudos ou mesmo em épocas anteriores a eles.

Caso o reservatório inutilize um ou mais postos a montante, será necessário definir um novo local para implantação de postos substitutos, preferencialmente no final do reservatório. Caso seja possível, o posto parcialmente inundado poderá ser mantido, mediante um remanejamento prévio de alguns lances de réguas.

O posto limnigráfico e os postos limnimétricos deverão estar instalados até o início do enchimento do reservatório.

Nos estudos de remanso serão identificadas as vazões e seções do reservatório para as quais o efeito do remanso passa a se intensificar. Com esses resultados será definido o trecho de importância fundamental para o levantamento dos níveis d'água e para avaliação da área inundada.

Sugere-se, para as réguas limnimétricas, que o registro de níveis, mesmo que manual, acompanhe o ritmo de enchimento do reservatório, de forma a se levantar as superfícies de inundação durante as operações de resgate da fauna e acompanhamento dos limites da área inundada. Para a fase de operação, deverão ser alvo de leituras feitas por observador local, segundo procedimento usual de duas leituras diárias, às 7 e às 17 horas.

A coleta de dados e a manutenção dos postos limnimétricos e do posto limnigráfico, deverão ser realizadas por técnicos de hidrometeorologia da equipe de operação do aproveitamento.

Eventualmente, durante o enchimento, as frequências de leitura das réguas e da coleta das cadernetas poderão ser fixadas em função do ritmo de subida do nível d'água.

Os dados dos postos limnimétricos e dos postos limnigráficos deverão ser analisados, consistidos e processados por técnicos de hidrologia da equipe de

operação do Empreendimento e armazenados no banco de dados. Os dados de níveis d'água a serem considerados serão os seguintes:

- postos limnigráficos: armazenamento dos níveis d'água a cada 1 hora;
- postos limnimétricos: armazenamento das duas leituras diárias (7 e 17 horas).

Os dados oriundos do monitoramento de níveis d'água serão utilizados para subsidiar as seguintes atividades:

- determinação da variação de níveis d'água a jusante da barragem, por influência da operação da usina, para comparação com as condições naturais, antes da implantação da barragem;
- determinação mais precisa da disponibilidade hídrica do reservatório durante a fase de operação (cálculo do volume em função dos níveis d'água);
- determinação mais precisa dos limites da área de inundação.

d) Responsável pela Implementação

Esse monitoramento, além de objetivos ambientais, está intimamente ligado às questões operativas do Empreendimento, sendo, portanto, uma atividade a ser desempenhada dentro da estrutura a ser montada para sua operação.

A avaliação de níveis d'água a montante e a jusante da barragem deverá ser feita com base nos postos limnigráficos a serem instalados para auxiliar a operação da usina.

e) Cronograma

O monitoramento dos níveis d'água deverá se estender por, no mínimo, dois anos completos após o enchimento do reservatório.

5.2.2.2 – Monitoramento Sedimentológico

a) Introdução

O aporte de sedimentos a um reservatório é função das vazões afluentes e das concentrações sólidas, que, por sua vez, estão diretamente relacionadas com a ação antrópica na bacia, variável ao longo do tempo.

b) Objetivo

A finalidade deste programa é acompanhar a evolução do depósito de sedimentos e avaliar os aportes das descargas sólidas ao reservatório, correspondentes à bacia contribuinte situada a montante do eixo.

c) Ações

Em geral se faz a implantação de uma rede sedimentométrica nos principais tributários ao reservatório, fora da área de remanso, e no curso do rio principal, logo a montante do final do remanso do reservatório. De preferência as medições deverão se iniciar nas fases de estudos preliminares do aproveitamento.

As medições de descarga sólida e levantamentos batimétricos poderão ser realizadas pela equipe responsável pelo monitoramento dos níveis d'água, com a devida compatibilização dos dois programas, ou seja, o local para as medições de descarga sólida e levantamentos batimétricos poderá ser o mesmo do monitoramento dos níveis d'água.

A coleta do material em suspensão seguirá o método IVC (Integração Vertical Contínua). Segundo esse método, o operador mantém uma velocidade constante do amostrador durante a descida e durante a subida, na subida e descida podem ser diferentes, porém devem ser constantes em cada uma das trajetórias. Os valores recomendados situam-se entre 0,2 e 0,4 da velocidade média da água na vertical de amostragem.

Um cuidado especial deve ser tomado para que o amostrador não bata no leito do rio, coletando material que não se encontra em suspensão, tornando irrelevante a amostragem.

Em cada uma das verticais de coleta de amostra de sedimento em suspensão será feita uma coleta de material de fundo. Esse material será colocado em sacos plásticos, devidamente etiquetados, que seguirão ao laboratório juntamente com as amostras em suspensão.

As análises de laboratório deverão envolver a determinação de curvas granulométricas do material em suspensão e de fundo, através do método de remoção pela base. Após as análises de laboratório, deverá ser feito o cálculo de descarga sólida total pelos métodos mais aplicáveis, por exemplo, de Einstein, Einstein Modificado e Colby. A partir desses cálculos, será possível a comparação entre os métodos utilizados e será possível estabelecer relações funcionais entre níveis d'água e vazão sólida, para cada posto constante da rede.

Os dados finais farão parte do banco de dados do Empreendimento e estarão à disposição para verificações do assoreamento do reservatório e para permitir a ampliação do conhecimento nessa área.

d) Responsável pela Implementação

As atividades básicas deste monitoramento são a medição de descargas sólidas e a realização de levantamentos batimétricos em pontos críticos, que via de regra são os trechos junto às confluências dos tributários e extremidade de montante do reservatório, junto ao rio principal, onde se formam os “depósitos de remanso”.

Essas atividades estão também vinculadas à operação do Empreendimento, e seus resultados servirão de subsídio tanto para as questões operativas, quanto para questões ambientais.

Dessa forma, o monitoramento sedimentológico deverá ser realizado pela equipe de operação, que cuidará também do monitoramento dos níveis d'água.

g) Cronograma

Durante a construção deverão ser feitas medições de descarga sólida pelo menos duas vezes por ano, sendo uma delas no período de cheias.

O monitoramento das descargas sólidas será realizado uma vez por mês ao longo dos dois primeiros anos após o enchimento do reservatório, passando a bimestral após esse período. O levantamento batimétrico das seções transversais do reservatório deverá ser realizado com frequência semestral, começando um ano antes do enchimento do reservatório, e prosseguindo após o enchimento, por, no mínimo, 2 anos.

5.2.2.3 – Medidas para Controle do Assoreamento em Reservatórios

As medidas para controle do assoreamento em reservatórios são, em geral, de complexa implantação, uma vez que o sedimento é derivado da erosão de toda a área de drenagem afluyente à barragem, sendo de difícil acesso ao Empreendedor responsável pelo aproveitamento. Na maioria das vezes, um programa de controle de erosão em toda a bacia hidrográfica somente é exequível com a participação do governo. Ou, mais recentemente, dos órgãos gestores (comitês) das bacias hidrográficas.

Assim, em geral o Empreendedor se limita a atuar nas margens dos rios e do reservatório, para diminuir o aporte de sedimentos.

Dentre as medidas mais efetivas para o controle da erosão tem-se a preservação de florestas nas cabeceiras dos rios, na alta bacia. As medidas preventivas para controle do assoreamento de reservatórios, apesar da dificuldade para implantação, ainda são menos onerosas e mais eficientes que as medidas corretivas, aplicáveis apenas a casos onde não existem outras alternativas. Na Tabela 5.2.1 a seguir são apresentadas as medidas preventivas recomendadas (CARVALHO, 2000).

Tabela 5.2.1 – Medidas Preventivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório

MEDIDAS PREVENTIVAS		
Seleção do local do aproveitamento	Se mais de um local for disponível para a barragem e formação do reservatório, selecionar aquele que tiver menor aporte de sedimentos	A escolha do local vai depender dos custos financeiros que incluam a proteção da área mais desprotegida
No projeto do reservatório	Prever volume morto adequado	Aumento da altura da barragem
	Prever volume reservado para sedimento	Aumento da altura da barragem
	Prever descarregador de sedimento com comportas (para correntes de densidade e para sedimento do leito)	Usinas afastadas da barragem necessitam de desarenador após a tomada d'água
Controle de erosão na bacia (traz benefícios diversos, sendo o mais eficiente mas de difícil aplicação pelo barrageiro; necessário pedir apoio de outras entidades para o gerenciamento de bacia)	Conservação e manejo do solo na agricultura (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990 apud CARVALHO, 2000)	Práticas vegetativas: – Florestamento e reflorestamento – Pastagens – Plantas de cobertura – Culturas em faixas – Cordões de vegetação
		Práticas edáficas: – Controle do fogo – Adubação verde – Adubação química – Adubação orgânica
		Práticas mecânicas: – Distribuição racional dos caminhos – Plantio em contorno – Terraceamento – Sulcos e camalhões – Canais escoadouros
	Controle de sedimento em estradas, em cidades, em obras diversas, controle de erosão urbana e rural	– Contenção ou proteção de taludes – Obras de drenagem – Controle de erosão em ravinas e voçorocas
Controle de erosão nos cursos d'água e margens de reservatórios	Erosão nas calhas Desbarrancamentos	– Proteção com vegetação ciliar – Proteção estrutural (enrocamento, espigões, etc)
Controle da afluência de sedimento já na calha	Barragens a montante (pode ser submersa, se for conveniente)	Retirar periodicamente o sedimento retido
	Rede de vegetação	
	Canais de derivação em <i>by-pass</i>	– Canal – Conduto
	Desvio de enchentes para área de inundação	Bacias de decantação
Controle de deposição de sedimentos	Descarregador com comporta (operação planejada)	Correntes de densidade Sedimento de fundo
	Depleção do reservatório	Uma grande depleção do reservatório provoca o escorregamento dos depósitos para o volume morto
	Operação planejada do reservatório	Existem programas de computador para essa operação visando acomodação do sedimento

Fonte: CARVALHO, 2000

Na Tabela 5.2.2 a seguir tem-se um resumo das medidas corretivas, caras e repetitivas, a serem aplicadas quando o assoreamento passa a comprometer o reservatório.

Em geral são aplicáveis a pequenos reservatórios, mais suscetíveis à redução nos volumes de armazenamento por deposição de sedimentos ou por apresentarem depósitos em posições indesejadas, como na frente da tomada d'água, por exemplo.

Tabela 5.2.2 – Medidas Corretivas do Controle de Sedimentos e do Assoreamento do Reservatório

MEDIDAS CORRETIVAS		
Remoção do sedimento do reservatório	Dragagem (local de deposição é importante)	Eventual ou Quase permanente
	Obras de derivação by-pass	Canal ou Conduto
	Sifonagem	Por cima da barragem ou às vezes retirando sedimento mais distante através do descarregador de fundo
	Descarregador de fundo	Às vezes sendo necessário construir já com a barragem pronta
Alteamento da barragem	Dimensionar adequadamente	Quando possível porque aumentará o nível e o espelho d'água

Fonte: CARVALHO, 2000

Um dos maiores problemas da dragagem, além do custo, diz respeito ao local de despejo do material retirado. Dificilmente se consegue utilizar esse material, devido aos custos envolvidos e outros fatores, como a poluição do sedimento ou problemas de transporte até o local de aproveitamento. Em princípio, poderia se pensar em aproveitar o sedimento grosso da área do delta como material de construção e o sedimento fino, que contém nutrientes, na agricultura. No entanto, nos reservatórios pequenos, essa separação não é tão nítida e os depósitos podem conter muitas impurezas, como lixo e outras.

Os equipamentos mais comuns utilizados para a retirada dos sedimentos são o sistema mecânico (“drag-line” ou “clam-shell”) e as dragas de sucção e recalque, que utilizam bombas centrífugas para executar o transporte hidráulico do material (ENGEVIX, 1980 apud CARVALHO, 2000).

O despejo do material dragado envolve questões econômicas e ambientais. A deposição na margem do reservatório ou no canal de jusante pode não solucionar o problema e produzir novos custos. No primeiro caso pode causar o retorno do

material ao reservatório e no segundo caso pode assorear o canal do rio. Uma das alternativas é utilizar o material para a construção de diques marginais aos rios, para proteção de áreas sujeitas a enchentes. Países como a China e Taiwan (Formosa) utilizam, com sucesso, o material dragado e selecionado em áreas agrícolas (CARVALHO, 2000).

Por todos os aspectos citados, deve-se sempre comparar o custo da dragagem com outras alternativas, como elevar a altura da barragem, por exemplo.

5.2.2.4 – Medidas para Controle de Erosão a Jusante

Com relação à erosão no canal de jusante da barragem, deve-se adotar medidas para seu controle. A principal é projetar a barragem para conviver com a erosão, caso exista a possibilidade dela evoluir em direção à sua fundação. Mas também devem ser verificadas as interferências da erosão no canal do rio a jusante sobre pontes, diques marginais e tomadas d'água. Na Tabela 5.2.3 a seguir tem-se as medidas preventivas e corretivas aplicáveis.

Tabela 5.2.3 – Controle de Erosão no Canal de Jusante de Barragem – Medidas Preventivas e Corretivas

Medidas preventivas (Estudos na fase de projeto)	Encouraçamento	Verificar por modelos se o sedimento grosso do leito é suficiente para proteger
	Mudança de declividade	Verificar por modelos se a declividade não mudará além de certo limite
Medidas corretivas	Enrocamento	
	Obras estruturais	

Fonte: CARVALHO, 2000

5.2.2.5 – Monitoramento Hidrogeológico

a) Introdução

O conhecimento das alterações do nível freático devidas ao enchimento e operação do reservatório é importante para uma melhor caracterização dos impactos previstos, a saber: acréscimo na disponibilidade das águas subterrâneas; perenização e formação de novas áreas úmidas e alagadas; acréscimo da

vulnerabilidade dos aquíferos; escorregamentos, deslocamentos de blocos e erosões; colapsos, abatimentos, subsidências, surgências e fugas d'água; efeitos de variações do nível freático.

Os fatores e parâmetros que influenciam as alterações do nível freático, bem como as condições de contorno e iniciais dos aquíferos, são bastante variáveis e nem sempre seus valores estão disponíveis.

Para se ter uma avaliação prévia do comportamento hidrogeológico local deve-se efetuar um levantamento de poços rasos instalados no lençol freático, obtendo-se a sua localização com GPS, profundidade do nível d'água e materiais atravessados, sempre que possível. O levantamento poderá indicar a existência e a magnitude das variações desses níveis d'água conforme a época de cheia ou de seca. Uma avaliação quantitativa das alterações do nível freático depende da implantação de um programa de monitoramento sistemático e contínuo.

b) Objetivo

O monitoramento do nível freático tem por objetivo avaliar as suas variações na borda do reservatório e a jusante da barragem, antes, durante e após o enchimento.

Paralelamente ao monitoramento dos níveis d'água dos aquíferos, deverá ser efetuado um monitoramento da qualidade das suas águas, especialmente em locais de maior concentração de fontes de contaminação, como nas áreas urbanas, nas proximidades de fossas, cemitérios e aterros sanitários.

Para monitorar o acréscimo na disponibilidade da água subterrânea, deverão ser selecionados poços existentes, principalmente nas áreas urbanas junto ao reservatório e a jusante da barragem.

Para monitorar a perenização e a formação de novas áreas úmidas e alagadas e o acréscimo da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, os poços de monitoramento serão selecionados ou instalados no aquífero freático, principalmente nas áreas urbanas e, de preferência, em áreas de planície de

inundação, terraços, sempre que presentes, e nas proximidades de fontes de contaminação.

A elevação e as variações do nível freático e suas relações com eventuais colapsos, abatimentos, subsidências, surgências e fugas d'água deverão ser observadas em poços selecionados ou instalados nas regiões onde forem registradas ocorrências de rochas carbonáticas e onde o detalhamento da fotointerpretação e do mapeamento geológico de campo indicar eventuais feições e/ou estruturas de dissolução.

c) Ações

O monitoramento hidrogeológico inclui atividades preliminares, como:

- Levantamento Geofísico para mapeamento da pluma de contaminação de uma eventual fonte pontual de contaminação, como um aterro sanitário.

Deverá ser adotado o método de eletroresistividade ou eletro-magnético indutivo.

- Fotointerpretação e mapeamento geológico-geotécnico e hidrogeológico.

Deverá ser efetuada fotointerpretação e mapeamento geológico-geotécnico de detalhe de áreas com ocorrência de rochas calcárias, aluviões, arenitos, coluviões e corpos de tálus, quebras de relevo, depressões naturais e artificiais e fontes de contaminação. Nessas atividades deverão ser utilizadas fotos aéreas e plantas e ser dirigidas para a identificação de eventuais estruturas de dissolução.

Cada um dos pontos deverá estar indicado por números em plantas bases, amarrado com GPS e caracterizado em caderneta de campo, destacando os aspectos de interesse aos estudos em andamento.

- Investigações de subsuperfície e instalação de poços de monitoramento.

As investigações de subsuperfície deverão constar basicamente de poços de monitoramento, que serão selecionados entre os poços existentes na área e/ou instalados no aquífero freático com a finalidade de controle dos níveis d'água e de coleta de amostras para ensaios de qualidade da água subterrânea.

As profundidades dos níveis d'água serão transformadas em cotas, sempre que possível, para fornecer a superfície potenciométrica do aquífero livre.

As sondagens a percussão efetuadas para a instalação dos piezômetros serão utilizadas também para coleta de amostras e caracterização geológica, geotécnica e hidrogeológica dos materiais atravessados e para determinação de parâmetros como a condutividade hidráulica, determinada em ensaios de recuperação do nível d'água e/ou do tipo “slug-test”.

As investigações deverão ser conduzidas de acordo com as diretrizes da ABGE (1990, 1996) e da ABNT (1997). Os poços de monitoramento, cuja função seja de medição do NA e coleta de amostras, deverão ser instalados em sondagens a percussão de 6”, apresentar diâmetro de 2”, trecho filtrante entre 0,50 m e 1,0 m, instalado abaixo do nível d'água, nos materiais de maior condutividade hidráulica atravessados, e interceptando prováveis plumas de contaminação. O trecho filtrante deverá ser totalmente envolto por areia grossa e pedrisco na base (aproximadamente 15 a 30 cm), ao redor do tubo filtro e no topo (aproximadamente 15 a 30 cm). Acima, deverá ser providenciado selo de bentonita e calda de cimento de pelo menos 50 cm, complementado com argila até a superfície do terreno. No caso de poços com a finalidade exclusiva de medição do NA, poderão ser efetuadas sondagens de 4” e instalados monitores com 1” de diâmetro, conforme Figura 5.2.1 a seguir.

Figura 5.2.1 – Perfil Esquemático para Instalação dos Monitores
 Fonte: THEMAG, 2002

Todos os poços de monitoramento deverão estar protegidos por tubos metálicos no diâmetro 6", chumbados pelo menos 0,8 m abaixo da superfície do terreno, restando aproximadamente 0,7 m acima, providos de tampas com cadeados, que abrem e fecham com chave única para todos os poços instalados. O tubo interno deverá ser provido de tampa com rosca. Esses poços de monitoramento deverão permanecer ativos e serem incorporados ao programa de monitoramento a ser desenvolvido até após o enchimento do reservatório.

Todos os poços de monitoramento, após instalação, deverão ser submetidos a ensaios de recuperação, através do esgotamento e medidas de recuperação dos níveis de água até a posição original, anotando-se a posição desses níveis durante toda a recuperação, com frequência a cada minuto no início, passando para 2 min, 15 min e 30 min, respectivamente após 10 min, 30 min e 60 min do início do ensaio. Esses dados deverão ser utilizados para cálculos de condutividades hidráulicas, além de fornecer uma avaliação do funcionamento dos poços.

As sondagens a percussão serão executadas com ensaios SPT a cada metro e paralisadas no impenetrável ao SPT. As sondagens a percussão, a trado e os poços de inspeção deverão avançar até o nível d'água ou impenetrável, devendo ser paralisados, obrigatoriamente, no caso das SP, e preferencialmente nas demais, após ter atravessado todo o material aluvionar e/ou coluvionar. Caso os impenetráveis sejam obtidos a profundidades pequenas, deverão ser efetuados deslocamentos para melhor caracterização.

Nas sondagens a percussão, a trado e nos poços de inspeção estão previstas coletas de amostras do material atravessado a cada metro ou sempre que ocorrer mudança de material.

As sondagens a trado e os poços de inspeção deverão ser efetuados para auxiliar o mapeamento geológico-geotécnico. As sondagens a trado deverão

ser efetuadas no diâmetro de 4" e os poços deverão apresentar dimensões de 1,5 x 1,5 m.

Em cada uma das sondagens a percussão, está previsto um ensaio de infiltração, a ser efetuado nos materiais mais permeáveis atravessados, preferencialmente em cascalhos arenosos e em areias.

Atenção especial deverá ser dada às leituras dos níveis d'água nos poços, trados e sondagens a percussão, devendo ser medidos quando atingidos, cinco minutos após, diariamente antes do prosseguimento das sondagens e após aproximadamente 24 horas da conclusão.

Os poços de abastecimento de água, rasos e profundos, selecionados para as leituras dos níveis d'água, e os poços instalados com essa finalidade deverão ser identificados no campo e nas fichas de cadastro, amarrados topograficamente e nivelados.

- Coleta das amostras e execução das análises químicas.

Como em geral ocorre a utilização da água subterrânea, principalmente em áreas urbanas, através da captação em poços rasos e profundos e também ocorrem fontes de contaminação, deverá ser efetuado o monitoramento da qualidade da água dos aquíferos livres em poços de monitoramento instalados e em poços já existentes para conhecer a sua qualidade previamente e após o enchimento do reservatório. Os parâmetros a serem determinados, a princípio, são aqueles que definem os padrões de potabilidade: aspecto, odor, cor, turbidez, resíduo seco, pH, alcalinidade de hidróxidos, de carbonatos e de bicarbonatos, dureza total, oxigênio consumido, nitrogênio amoniacal, albuminóide, nitroso e nítrico, ferro, cloreto, fluoreto, arsênio, cobre, chumbo, zinco, bário, selênio, manganês, cádmio, cromo VI, mercúrio, cianetos, resíduos orgânicos, características microbiológicas.

- Acompanhamento do programa e interpretação dos resultados

Estas atividades serão dirigidas para a proposição de modelos hidrogeológicos que deverão fundamentar as análises de elevação do lençol freático.

Deverão ser efetuadas análises da elevação do lençol freático com base em modelos hidrogeológicos fundamentados nos estudos de campo e nas interpretações dos dados. Os dados obtidos com o enchimento deverão ser utilizados na calibração e atualização dos modelos hidrogeológicos e das análises de elevação do lençol freático efetuadas previamente.

d) Responsabilidade pela Implementação

A implementação e o desenvolvimento do programa de monitoramento hidrogeológico são de responsabilidade do Empreendedor. Caso sejam necessárias medidas preventivas contra a contaminação das águas subterrâneas, como: evitar a instalação de novas fontes de contaminação na área de influência do reservatório, controlar e tratar os contaminantes nas fontes e eliminar poços de abastecimento localizados nas zonas de desenvolvimento de plumas de contaminação, os órgãos estaduais e municipais competentes serão chamados a colaborar.

e) Cronograma

Entre a data da implantação do programa e até dois meses antes do enchimento do reservatório, em todos os poços de monitoramento e nos poços rasos e profundos selecionados, deverão ser efetuadas leituras de nível d'água a cada seis meses, no mínimo, nas estações seca e chuvosa e no caso de precipitações significativas.

Caso não haja tempo suficiente, deverão ser efetuadas, no mínimo, duas leituras do nível d'água antes do enchimento do reservatório, uma na estação seca e outra na estação chuvosa. Por um período de 2 meses antes do período de enchimento, durante o enchimento e por 2 meses após a conclusão do enchimento, as leituras

deverão ser quinzenais. Após dois meses da conclusão do enchimento, as leituras deverão ser semestrais, no mínimo uma na estação seca e outra na estação chuvosa e sempre que ocorrerem grandes variações nos níveis d'água do reservatório ou precipitações significativas na bacia. A princípio, prevê-se um acompanhamento das variações até dois anos após o enchimento. Depois desse período, será avaliada a necessidade de prosseguir com o programa de monitoramento e sua frequência.

Deverão ser efetuadas coletas e análises de amostras de água subterrânea no início da implantação do programa, uma antes do enchimento, uma após 2 meses do enchimento e outra após 6 meses do enchimento. Os resultados obtidos orientarão a continuidade do programa.

5.2.2.6 – Medidas para o controle da elevação do lençol freático

As medidas para controle da elevação do lençol são basicamente de drenagem e impermeabilização, que são soluções de custo elevado. Ou, então, deve-se adotar medidas de convivência com o problema, através do reforço de fundações de obras nas áreas afetadas. A seguir apresentam-se alguns exemplos de soluções para o problema.

– Reservatório de Lacul Morii

O reservatório de Lacul Morii no rio Dâmbovita, a montante de Bucareste, capital da Romênia, foi formado pela construção de um dique de terra de 4,3 km de extensão, na margem direita, originando a planície de inundação, aproveitando a topografia do terreno na margem esquerda, um terraço aluvial, resultando na elevação de 10 m no NA natural do rio (SELĂRESCU; TECUCI; POPESCU, 1994 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002). O volume útil é de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ e os terrenos locais são constituídos de camadas quaternárias, intercaladas de areias finas, médias, grossas, cascalho, argilas e siltes.

Nas vizinhanças da área de implantação do reservatório já existiam condomínios residenciais verticais, instalações industriais, estruturas subterrâneas do Metrô de Bucareste, dentre outras, que exigiam a instalação prévia de estruturas protetoras.

Os cálculos teóricos da elevação do NA subterrâneo utilizaram modelagem matemática e cobriram uma faixa de 1,5 km a 2 km no entorno do reservatório. Os resultados obtidos mostraram que, caso não fosse instalado sistema de drenagem, as elevações do freático atingiram entre 1 m e 6 m na área da planície de inundação (margem direita) e entre 1 m e 8 m na área do terraço aluvial (margem esquerda). Com base nesses resultados foi projetado um sistema de drenagem e de impermeabilização para o perímetro do reservatório, para garantir a manutenção das condições naturais das águas subterrâneas nas zonas adjacentes.

Após o enchimento do reservatório, em 1988, constatou-se a precisão dos estudos de prognóstico e a adequação das soluções de projeto adotadas, tanto a nível de concepção como de extensão, na totalidade do contorno do reservatório.

– Reservatório da Barragem de Benímar

Esse reservatório, localizado no rio Grande de Adra, na Província de Almería, sudeste da Espanha, foi formado em 1982, com capacidade para $70 \times 10^6 \text{ m}^3$, barragem de 87 m de altura, e destina-se ao abastecimento de água para a cidade de Almería e para a irrigação de 20.000 ha em estufas (ALCALÁ; FERRÁNDEZ, 1997 apud ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

Quando de sua implantação, não foi feita a impermeabilização da zona cárstica do Aquífero Fuentes de Marbella, por onde ocorre grande infiltração da água do reservatório. Enquanto não se consegue promover a correção do problema, os autores sugerem a utilização conjugada, do reservatório mais a captação da água infiltrada por bombeamento. Segundo sua avaliação, os recursos extras em energia para extração da água através de poços, seriam compensados pela economia de água e das taxas pagas pelos usuários irrigantes.

– Reservatório da UHE Três Irmãos

As medidas para atenuar os efeitos da elevação do lençol freático adotadas pela CESP na cidade de Pereira Barreto incluíram o reforço de estruturas ou reconstrução de cerca de 300 casas, reinstalação de rede de esgoto e estação de tratamento de esgoto, construção de cemitério suspenso, remoção de um antigo lixão, além de outras medidas compensatórias da obra como um todo (ALBUQUERQUE FILHO, 2002).

5.2.3 – Terrenos

5.2.3.1 – Monitoramento e Estabilização de Encostas Marginais

a) Introdução

O enchimento do reservatório e as variações de nível d'água durante sua operação aceleram ou reativam os processos erosivos das encostas, devido à elevação do nível freático e aparecimento de surgências d'água nas paredes dessas erosões. Com essa aceleração ou reativação, há a propagação dessas erosões para montante, a partir das bordas do reservatório. Novas erosões provocadas pela ação e embate das ondas poderão ocorrer, principalmente se houver a presença de materiais arenosos em terraços e planícies de inundação e solos arenosos ao longo do contorno do reservatório. A rede de drenagem recortando as margens do reservatório também favorece esses processos erosivos. Caso existam aluviões arenosos a jusante da barragem, que possam ser alimentados pelo reservatório, estarão sujeitos a processos erosivos que poderão ser bastante intensificados.

A submersão parcial das encostas, a elevação do nível freático e suas oscilações e o embate de ondas favorecem o desenvolvimento de novos processos de instabilização das encostas ou a reativação de outros já instalados, com a ocorrência de deslizamentos e deslocamentos de blocos devido à redução na resistência das unidades geológico-geotécnicas mais susceptíveis às instabilizações.

Processos erosivos e de instabilização podem ser gerados também pela relocação de estradas e de acessos.

O enchimento do reservatório pode, ainda, deflagrar fenômenos de colapsividade e expansividade dos solos. No caso de eventuais feições de dissolução em rochas calcárias, poderão ocorrer colapsos, abatimentos e subsidências, além de surgências e alterações nas condições de fluxo e movimentação da água subterrânea, inundação e expulsão de ar dessas estruturas de dissolução.

b) Objetivo

O programa de monitoramento e estabilização de encostas marginais deverá detalhar o potencial e as características dos processos erosivos, de escorregamentos e deslocamentos de blocos e dos eventuais fenômenos relacionados com solos colapsíveis e expansíveis.

O programa deverá recomendar medidas de proteção de implantação imediata, em locais de relevante criticidade, que tendem a se agravar com o enchimento do reservatório, e o monitoramento das propriedades das demais unidades geológico-geotécnicas envolvidas.

c) Ações

Estão previstas as seguintes atividades:

- Execução das investigações de campo.
 - Implantação de instrumentação, constituída, no mínimo, pelos poços indicados para o monitoramento hidrogeológico, que serão utilizados também no presente programa.
 - Levantamento de trincas e fissuras nas construções e instalação de marcos superficiais e piezômetros.

As investigações de subsuperfície, instalação de monitores, amostragens e ensaios programados deverão ser conduzidos de acordo com as diretrizes para execução de sondagens e ensaios da ABGE (1990, 1996) e da ABNT (1997).

Os piezômetros deverão ser instalados em sondagens de 4", apresentar diâmetro de 1", trecho filtrante de 0,5 a 1,0m e estarem localizados na base dos colúviões.

O trecho filtrante deverá ser totalmente envolto por areia grossa e pedrisco na base (aproximadamente 15 a 30 cm), ao redor do tubo filtro e no topo (aproximadamente 15 a 30 cm). Acima deverá ser providenciado selo de bentonita e calda de cimento de pelo menos 50 cm, complementado com argila até a superfície do terreno (ver Figura 5.2.1).

Todos os piezômetros deverão estar protegidos por tubos metálicos no diâmetro 6", chumbados pelo menos 0,8 m abaixo da superfície do terreno, restando aproximadamente 0,7 m acima, providos de tampas com cadeados, que abrem e fecham com chave única para todos os piezômetros instalados. O tubo interno deverá ser provido de tampa com rosca. Esses piezômetros deverão permanecer ativos e serem incorporados ao programa de monitoramento a ser desenvolvido até após o enchimento do reservatório.

Todos os piezômetros, após instalação, deverão ser submetidos a ensaios de recuperação, através de esgotamento e medidas de recuperação dos níveis de água até a posição original, anotando-se a posição desses níveis durante toda a recuperação, com frequência variável, como a sugerida a seguir: a cada minuto no início, passando para 2 min, 15 min e 30 min, respectivamente após 10 min, 30 min e 60 min do início do ensaio. Esses dados deverão ser utilizados para cálculos das condutividades hidráulicas, além de fornecer uma avaliação do funcionamento dos poços.

As sondagens a trado e poços de inspeção deverão avançar até o nível d'água ou impenetrável, tendo atravessado todo o material aluvionar e/ou coluvionar.

Caso os impenetráveis sejam obtidos a profundidades pequenas, deverão ser efetuados deslocamentos para melhor caracterização.

As sondagens a percussão deverão atravessar totalmente os aluviões e coluviões. Caso os impenetráveis sejam obtidos a profundidades pequenas, deverão ser efetuados deslocamentos para melhor caracterização. As sondagens a percussão, para as quais não for prevista a instalação de piezômetros, deverão ser no diâmetro 2 ½” e aquelas para as quais forem previstos piezômetros deverão ser no diâmetro 4”.

Nas sondagens a percussão, deverão ser previstos ensaios SPT e coleta de amostras a cada metro ou sempre que ocorrer mudança de material. Nos trados e poços, a coleta de amostras deverá ser a cada metro ou sempre que ocorrer mudança de material. Nos poços, poderá ser solicitada a coleta de amostras indeformadas e deformadas, caso necessários ensaios adicionais de laboratório.

Atenção especial deverá ser dada às leituras dos níveis d’água nos poços, trados, sondagens a percussão, devendo ser medidos quando atingidos, cinco minutos após, diariamente antes do prosseguimento de sondagens e após a conclusão, transcorridas aproximadamente 24 horas da conclusão.

Deverão ser instalados marcos superficiais e pinos de referência em edificações dos locais de ocorrência de solos colapsíveis.

O cadastramento de trincas e de outros problemas em construções existentes é denominado perdigueiragem. Antes do enchimento do reservatório, deverá ser feito o levantamento e inspeção das edificações, com anotações e fotos dos problemas encontrados nas regiões onde podem ocorrer movimentos devido a colapso. Essas regiões serão objeto de detalhamento após investigações e ensaios de laboratório.

- Elaboração da fotointerpretação e mapeamento geológico-geotécnico, acompanhamento das investigações de campo e interpretação dos resultados.

A caracterização geológico-geotécnica dos locais indicados como críticos e passíveis de instalação dos processos de instabilização será obtida através de:

- fotointerpretação geológica utilizando fotos aéreas e plantas;
 - mapeamento geológico-geotécnico de campo, investigações geofísicas e realização de sondagens manuais e mecânicas para caracterização dos tipos de materiais e suas espessuras, obtenção de amostragens, indicação dos afloramentos de rochas, depósitos de materiais transportados, escorregamentos, trincas, erosões, rupturas, movimentações de massas, feições e/ou estruturas de dissolução em rochas calcárias. Adicionalmente serão considerados os dados obtidos no monitoramento hidrogeológico;
 - ensaios de laboratório, petrográficos e geotécnicos, dirigidos para a identificação de minerais expansivos, e ensaios de adensamento, para investigação de colapsividade e de expansividade.
 - determinação dos locais críticos e sua ordenação numa escala de prioridades, com base na origem, natureza e características dos materiais e considerando a declividade e extensão da encosta que estará emersa para as situações de enchimento e operação do reservatório, características das eventuais estruturas de dissolução.
- Acompanhamento das condições de estabilidade e erosões das encostas marginais

As inspeções deverão ser efetuadas com base em mapas topográficos e geológico-geotécnicos. Deverão ser observados: voçorocas, ravinamentos, sulcos de erosão; rupturas, incluindo cicatrizes novas e antigas; trincas nos solos e rochas; deslizamentos e tombamentos; surgências d'água / fugas de água; estruturas e feições de dissolução em eventuais rochas carbonáticas; feições de colapso, subsidência; funcionamento e conservação dos elementos de drenagem; tipos de solos e rochas atingidos e as características dos deslizamentos e demais fenômenos e processos instalados.

– Monitoramento do Recuo de Margem

O acompanhamento da evolução da erosão deve ser realizado a partir do método dos pinos, que consiste na cravação perpendicular à face do barranco de pinos de aço com comprimento de 0,5 a 1,0 m e 5 mm de diâmetro, espaçados de 1 a 3 m, de maneira a permitir a medida da evolução das erosões. Na extremidade dos pinos devem ser fixadas plaquetas de identificação, deixando-os expostos cerca de 10 cm, de modo a facilitar sua identificação. A cada nova medida, os pinos são novamente cravados. A Figura 5.2.2 a seguir apresenta o método (FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003).

Figura 5.2.2 – Implantação de Pinos e Estacas

Fonte: FERNANDEZ, 1995 apud DE VINCENZO JUNIOR, 2003

Alternativamente à utilização dos pinos o levantamento pode ser realizado a partir de seções topográficas transversais, tomando-se como referencial um marco topográfico adequadamente afastado do talude.

d) Responsabilidade pela Implementação

A implementação do programa de monitoramento e estabilização de encostas é de responsabilidade do empreendedor, cabendo aos órgãos públicos a responsabilidade de alertar os proprietários das futuras construções em áreas colapsíveis, a fim de que sejam tomadas medidas para reduzir os efeitos desses fenômenos.

e) Cronograma

Desde o início do programa, até aproximadamente dois meses antes do enchimento do reservatório deverão ser efetuadas leituras semestrais. Por um período de dois meses antes do enchimento, durante todo o enchimento e por dois meses após a conclusão do enchimento, as leituras deverão ser quinzenais. Após dois meses de conclusão do enchimento, as leituras deverão ser semestrais, no mínimo uma na estação seca e outra na estação chuvosa. A princípio, prevê-se um acompanhamento das variações até dois anos após o enchimento. Depois desse período será avaliada a necessidade de prosseguir com o programa de monitoramento e sua frequência.

Nos piezômetros, as medidas de nível d'água deverão ser efetuadas também logo após a instalação quando da execução dos ensaios de recuperação.

Deverão ser efetuadas inspeções sobre as condições de estabilidade, erosões e eventuais fenômenos relativos à solos expansíveis ou colapsíveis e rochas carbonáticas, imediatamente antes do enchimento, no final da estação chuvosa, ao final do enchimento e, durante a operação, a cada seis meses, pelo menos, ou após eventos de chuvas e grande intensidade, em todos os locais objeto do programa. Antes do enchimento do reservatório, essas inspeções devem se estender por toda a borda do lago.

5.2.3.2 – Medidas para Estabilização de Encostas Marginais

A seguir são apresentadas algumas medidas para a proteção quanto ao colapso e expansividade dos solos, proteção de taludes íngremes instáveis e proteção das margens do reservatório contra a erosão.

– Medidas de proteção quanto ao colapso dos solos

Caso os solos colapsíveis se apresentem sob a forma de solos arenosos ou coluviões fofos, em área com urbanização, recomenda-se, como medida para minimizar os efeitos de colapso nas novas construções, quando apoiadas em solo de compactidade fofa ($SPT \leq 2$), a substituição de 0,5 m de solo pelo próprio solo compactado sob as sapatas (Figura 5.2.3) ou a construção de brocas sob a viga baldrame (Figura 5.2.4). As construções das brocas, por questões executivas, devem levar em conta a não existência de N.A. Nas edificações existentes, serão colocados pinos para a mensuração dos recalques e verificação das causas dos eventuais danos. Para edificações maiores poderão ser utilizadas estacas.

Figura 5.2.3 – Substituição do Solo Fofo por Solo Compactado

Figura 5.2.4 – Construção de Brocas sob a Viga Baldrame

- Medidas de proteção quanto à expansividade dos solos

Quando forem encontrados solos expansíveis junto ao reservatório, com seu enchimento podem ocorrer rupturas localizadas nas encostas, as quais deverão ser tratadas com a escavação do material rompido e drenagem com drenos horizontais profundos, aliados a um filtro drenante de areia limpa entre o reaterro e o terreno natural. Na Figura 5.2.5 é apresentado o esquema de tratamento previsto.

Figura 5.2.5 – Tratamento de Ruptura de Solos Expansíveis

– Medidas de Proteção dos Taludes Íngremes Instáveis

Taludes íngremes poderão ficar instáveis com o enchimento do reservatório, pela saturação do solo, redução das pressões de sucção e variação do nível do reservatório.

O tratamento desses taludes deve prever a recomposição com aterro compactado de declividade de 1(V):1,5(H), ou outra que seja estável, com proteção vegetal. Entre o aterro compactado e o solo natural, deve ser prevista a construção de dreno de areia lavada, a fim de dissipar as pressões neutras elevadas neste contato.

Deve-se evitar interferir em corpos de tálus, uma vez que esses materiais, mesmo em taludes com declividades baixas, na presença de água, são muito instáveis e erodíveis.

– Medidas de Combate à Erosão

O solo junto ao reservatório é erodível quando se apresenta como areias com baixo teor de argila. Em geral se prevê, em toda a borda, uma faixa de revegetação e área de preservação. Tratamentos adicionais serão previstos quando da ativação dos fenômenos de erosão. Esses tratamentos geralmente consistem na condução das águas de forma controlada (canaletas, enrocamentos) e proteção vegetal.

Para os ravinamentos e erosões já existentes, é possível a intensificação dos fenômenos nas áreas não submersas e erosões adicionais por ação das ondas. Nesses casos, prevê-se a necessidade de reaterros, retaludamentos, proteção contra a ação de ondas, drenagem superficial e reordenamento das saídas de águas pluviais das cidades e estradas. Essas medidas deverão estar incluídas nos projetos de proteção das cidades, a serem implantados junto às margens do reservatório.

As erosões existentes tendem a se agravar, principalmente quando o nível d'água varia, pois haverá ação das águas em horizontes não trabalhados.

O aterro das áreas já erodidas será lançado sem controle de compactação e o material de empréstimo poderá ser o solo existente na região, isento de material orgânico.

As obras de drenagem são prioritárias, pois representam o controle do fluxo d'água causador dos fenômenos de erosão. Consistirão de canaletas de crista e de fundo da erosão, descida de água em degraus ou por chaminé, para dissipar a energia do fluxo, bueiros sob a pista, quando se tratar de vias urbanas ou estradas no entorno do reservatório, e condução até o reservatório.

Os taludes da erosão serão regularizados com uma declividade máxima de 1H:1V. Para os taludes de aterro, a declividade prevista é de 1(V):1,5(H), quando acima do NA e de 1(V):2(H), quando se apresentam submersos.

O tratamento superficial será por meio de proteção vegetal dos taludes, consistindo de uma mistura de sementes de gramas, capins e leguminosas. Sobre essa proteção, poderá ainda haver um tratamento urbanístico.

Para casos de erosões localizadas e de grandes proporções, podem ser feitas estabilizações de margens com rip-rap, ou pedra de mão, pedra argamassada ou gabiões, completada com vegetação apropriada, conforme Figuras 5.2.6 e 5.2.7. a seguir.

Figura 5.2.6 – Contenção por Rip-rap

Fonte: STARA et al., 2002

Figura 5.2.7 – Contenção por Gabiões Caixa

Fonte: STARA et al., 2002

5.2.3.3 – Monitoramento Sismológico

a) Introdução

As ocorrências sísmicas naturais e aquelas induzidas pelo enchimento do reservatório deverão ser identificadas através de monitoramento sismológico.

As medidas que devem ser adotadas, ainda na fase de planejamento das obras, devem ser a avaliação de riscos de sismicidade natural na região e dos possíveis sismos induzidos pela criação do reservatório. No caso de barragens com mais de 100 m de altura e/ou volume reservado superior a 10^9 m^3 (SHAYANI, 1979), os trabalhos de campo de geologia devem investigar, além da região das fundações da barragem, áreas próximas à ela e de maior profundidade do reservatório, dando atenção especial a distribuição de falhas e fraturas do maciço rochoso na

área de inundação. Casos críticos de falhas ativas poderão influir na posição definitiva do eixo da barragem.

Caso se disponha de dados históricos sobre a sismicidade do local, de forma a ser possível avaliar quantitativamente o risco sísmico, este dado deverá ser incluído como parâmetro de cálculo da estrutura da barragem.

De qualquer forma é necessário monitorar a atividade sísmica na área do futuro reservatório, iniciando-se o mais cedo possível, de modo a identificar possíveis variações nessa atividade induzidas pelo reservatório.

b) Objetivo

O monitoramento sismológico tem por objetivo avaliar a atividade sísmica natural na área de influência do reservatório, durante o período de um ano antes do enchimento, para comparação com o nível de atividade sísmica obtida durante e após o enchimento do reservatório, até após 2 anos, no mínimo. Essa comparação objetiva avaliar a eventual existência de impactos no nível de sismicidade natural devido ao enchimento do reservatório e orientar a adoção de procedimentos futuros.

Além de verificar a eventual ocorrência de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório, deve-se procurar obter a correlação entre sismos e feições geológicas e estruturais da área, determinar epicentros, intensidades, magnitudes, acelerações sísmicas, área de influência e orientar a continuidade do monitoramento sismológico durante a operação do empreendimento.

Serão utilizadas as estações sismográfica disponíveis na região e instalada pelo menos mais uma estação, junto ao reservatório.

c) Ações

Em geral é necessário instalar, no mínimo, uma estação sismográfica nas proximidades do reservatório, equipada com um registrador, sismômetro e equipamentos para rádio-transmissão dos dados, em local a ser indicado,

abrigado e protegido. A operação da estação requer a assistência de um técnico para manutenção periódica dos equipamentos. Caso a estação não seja equipada por equipamentos de rádio - transmissão, a coleta dos sismogramas deverá ser efetuada diariamente, por um técnico designado para essa finalidade.

A atividade sísmica deverá ser monitorada permanente e continuamente, com geração de sismogramas. A área de interesse para a caracterização sismológica será definida em função do tamanho do reservatório. Deverão ser registradas e monitoradas eventuais escavações a fogo em pedreiras e obras nas proximidades, para a correta interpretação dos sismogramas. Deve-se prever a utilização de "formulários sísmicos" para enquadrar o nível de sismicidade da área na escala Mercalli Modificada, através dos efeitos sentidos pela população, no caso de alguma ocorrência sísmica. Paralelamente à obtenção e análise dos dados da estação sismológica instalada no local, será efetuado um levantamento de sismos registrados no mesmo período por instituições, universidades e empresas, de forma a complementar o cadastro das ocorrências de sismos apresentada no diagnóstico ambiental.

A análise dos dados deverá ser bimestral ou por ocasião da eventual ocorrência de sismos considerados importantes.

Após as primeiras análises será verificada a necessidade da instalação de eventuais estações sismográficas adicionais para a correta localização dos eventos.

d) Responsável pela Implementação

A implantação da estação será de responsabilidade do empreendedor. Para as atividades de operação e manutenção poderá ser realizado um convênio com Universidades ou outras instituições, podendo-se delegar a esse órgão a interpretação e elaboração de estudos.

e) Cronograma

Deve-se instalar a Estação Sismográfica um ano antes do início do enchimento do reservatório, registrando-se os sismos ao longo desse ano e por, no mínimo, mais dois anos após o enchimento.

5.2.3.4 – Perda do Potencial Agrícola dos Solos Inundados

a) Áreas inundadas

Para esse impacto não existem medidas corretivas ou paliativas.

b) Salinização

A prevenção da salinização deve ser feita na fase do projeto de engenharia, mediante a implantação de um sistema de drenos que rebaixe a superfície do lençol freático. Pode-se também sobreirrigar a área, como medida complementar aos drenos, de forma a obter a mesma lixiviação do sal que se tem nas regiões sem escassez de chuvas. Tanto a drenagem como a sobreirrigação encarecem os custos do investimento inicial e de operação. Na Figura 5.2.8 a seguir tem-se o esquema de um sistema de drenagem.

Figura 5.2.8 – Salinização por Irrigação e Formas de Controle

Fonte: BRAGA et al, 2002

5.2.3.5 – Recomposição de Áreas Degradadas

A implantação do canteiro de obras e acampamento, bem como a exploração de áreas de empréstimo de solo, pedreiras e jazidas de areia e cascalho, além das áreas de bota-fora, resultam em extensas áreas degradadas.

De acordo com a legislação vigente “aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei” (Parágrafo 2º do Artigo 225, Capítulo VI, da Constituição do Brasil de 1988).

Além do cumprimento de uma imposição legal, a recuperação das áreas degradadas pelas atividades produtivas define uma postura atual de geração de riquezas, condizente com o desenvolvimento sustentado.

O projeto para construção do canteiro de obras e acampamento deve prever a utilização futura da área, de forma a minimizar os custos de recuperação.

Quanto às áreas de empréstimo de solo deve-se preferir as que ficarão abaixo da cota de inundação, o que minimiza, de forma considerável, a necessidade de recuperação. Os eventuais depósitos de areia e cascalho que se situarem no leito do rio, também não demandarão recuperação.

O material rochoso para enrocamento e agregado graúdo de concreto, em geral é obtido das escavações obrigatórias para implantação das estruturas de concreto, podendo ser complementado, se necessário, pelo aprofundamento de escavação do canal de fuga. Como alternativa para obtenção de blocos de maiores dimensões, poderá ser explorada pedreira, de preferência em área a ser submersa pelo reservatório. Desta forma, não haverá necessidade de recuperação da área.

b) Objetivo

O programa em questão visa recompor as áreas de apoio, empréstimo e bota-fora utilizadas para construção das estruturas, e que permanecerão fora da bacia de inundação, incluindo área do deplecionamento do reservatório.

A recomposição pretendida é o reafeiçoamento do terreno e a revegetação, de forma a reintegrar as áreas degradadas à paisagem do entorno, buscando a harmonização com a vegetação nativa da região. Desta forma, devem ser controlados os processos erosivos de zonas por ventura desestabilizadas e impedida a formação de ambientes alagadiços propícios à proliferação de vetores de doenças, além de permitir a retomada do uso e ocupação do solo e a recomposição cênica da área.

As áreas situadas nas proximidades da barragem receberão tratamento paisagístico, de forma a permitir uma adequação dos espaços situados no entorno das edificações permanentes, para a fase de operação.

c) Ações Previstas

Na fase de projeto deverá ser feita a delimitação das áreas a serem recuperadas, a definição das técnicas e das espécies vegetais a serem utilizadas, incluindo a adequação da exploração à recuperação futura.

Na fase de obras deverá ser feita a remoção e armazenamento do material vegetal e do horizonte superficial naturais, com vistas a facilitar a revegetação, através do estabelecimento de condições mais propícias para o desenvolvimento da vegetação no processo de recuperação.

O reafeiçoamento do terreno constará da recomposição topográfica, incluindo suavização dos taludes, adequação da rede de drenagem e reposição do solo de cobertura armazenado.

A revegetação e manutenção será feita por meio da adubação e correção do solo, do plantio e execução dos tratos culturais necessários, bem como da manutenção da área revegetada, por um período aproximado de dois anos.

d) Responsável pela Implementação

A implementação do Programa de Recuperação de Áreas Degradadas ficará a cargo do empreendedor.

e) Cronograma

A revegetação das áreas degradadas deverá ocorrer na época chuvosa, após o final da exploração das áreas de empréstimo e após o final das obras, no caso do canteiro e acampamento. A manutenção deve se estender por, no mínimo, dois anos após o plantio.

5.2.4 – Limnologia

5.2.4.1 – Monitoramento da Qualidade da Água

a) Introdução

Um rio, quando barrado, sofre alterações significativas resultantes, principalmente, da mudança da dinâmica da água (de sistema fluvial para sistema lacustre ou semi-lacustre). As características originais da água, aliadas à configuração do reservatório, ao seu tempo de residência, ao percentual da cobertura de vegetação a ser inundada e, ainda, às características da barragem e ao tipo de operação, definirão as condições limnológicas futuras do novo ecossistema.

Os reservatórios são, normalmente, considerados sistemas complexos, pois apresentam características de transição entre sistemas lóticos e lênticos. Os estudos limnológicos destes sistemas devem sempre estar acoplados aos de hidrometria, uma vez que apresentam condições específicas resultantes da vazão, flutuações de nível e da velocidade d'água.

Os estudos de monitoramento devem ser iniciados antes do enchimento e, na medida do possível, antes do início da construção da barragem, visto que informações prévias são fundamentais para a avaliação das alterações ecológicas que ocorrerão, podendo, inclusive, levar à adoção de medidas mitigatórias até então não previstas.

b) Objetivos

- Caracterizar as águas do rio principal barrado e demais afluentes, a montante e a jusante do empreendimento, antes, durante e após a formação do reservatório. A caracterização limnológica abrangerá dados físicos, químicos e biológicos da água;
- Fornecer subsídios aos estudos de ictiofauna;
- Identificar possíveis fontes de poluição, provenientes de atividades urbanas, industriais e agropecuárias;
- Acompanhar as variações das condições limnológicas do reservatório, em diferentes profundidades, visando a integridade dos equipamentos de geração;
- Subsidiar estudos de modelagem matemática da qualidade de água, possibilitando comparações entre o prognóstico e a realidade;
- Subsidiar os estudos de regra de operação das comportas dos vertedouros, com o objetivo de otimizar a qualidade da água a montante e a jusante;
- Fornecer subsídios a outras ações de manejo, como por exemplo controle de macrófitas.

c) Ações

- Monitoramento de 1ª Fase

Os pontos de coleta selecionados para a etapa inicial, de escoamento lótico, devem ser em número de 2 a 4, situados no rio principal, em locais com as seguintes características: facilidades de acesso, possibilidade de comparação de dados obtidos no Diagnóstico ou em outros estudos, proximidades dos centros urbanos e equidistância entre os pontos.

A ênfase para o monitoramento na etapa rio deve ser dada aos parâmetros físicos e químicos, embora parâmetros como clorofila “a” e coliformes também estejam contemplados nesta fase.

Os parâmetros selecionados devem ser os seguintes: temperatura, oxigênio dissolvido, transparência, cor, turbidez, pH, condutividade, oxigênio consumido, DBO, cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloreto, ferro total, dureza, nitrato, nitrito e amônia, fosfato, sílica, alcalinidade, sólidos totais em suspensão, fósforo total, nitrogênio Kjeldahl total, coliformes fecais, coliformes totais, clorofila “a”.

Em princípio, as coletas deverão ter a frequência bimestral até um ano antes do enchimento do reservatório.

– Monitoramento ao Final da 1ª Fase

Um ano antes do enchimento e durante o enchimento do reservatório a rede de monitoramento deverá ser ampliada.

Antes do enchimento, as amostragens poderão ser efetuadas apenas na superfície. Já com o enchimento, recomenda-se que sejam também feitas coletas de amostras nas camadas mais profundas (duas ou mais amostragens verticais, dependendo da profundidade).

Além dos pontos de coleta já contemplados na fase anterior, sugere-se que sejam incluídos outros pontos no rio barrado e nos principais afluentes, selecionando-se aqueles onde formar-se-ão os braços mais significativos do reservatório e onde, inclusive, possam ocorrer problemas relativos à futura qualidade da água.

Salienta-se, ainda, que durante o enchimento poderá haver necessidade de inclusão de pontos não demarcados previamente. A inclusão de novos pontos dependerá da situação observada pela equipe técnica de acompanhamento. Neste sentido, o Monitoramento deverá sempre, pelo menos a partir do enchimento, assumir um caráter dinâmico.

Para esta etapa prevê-se que sejam incluídas amostragens para a verificação dos metais pesados e de agrotóxicos, além das relativas às comunidades planctônicas (fito e zooplâncton) e bentônicas. Estas últimas deverão identificar os indivíduos a nível de espécie, e as concentrações quantitativas.

A importância da compreensão dos processos biológicos reside no fato de que profundas modificações irão ocorrer com o barramento. Como exemplo, cita-se a substituição que se dará na comunidade planctônica, onde a do rio será substituída por uma comunidade característica de água represada.

No caso específico do mercúrio, poderá haver a necessidade de envio de amostras para laboratórios especializados, visto que para a determinação de tal elemento há necessidade de equipamento de absorção atômica. Quanto aos agrotóxicos, a determinação se dá através da cromatografia gasosa, equipamento mais comum em laboratórios.

Sugere-se que, inicialmente, sejam feitas amostragens para a verificação de metais pesados e de agrotóxicos em apenas dois pontos selecionados, como no rio, a montante do futuro reservatório, e nas imediações da barragem. Caso sejam detectadas concentrações elevadas de mercúrio ou de agrotóxicos nas imediações da barragem e baixas concentrações no rio a montante, propõe-se que sejam efetuadas amostragens em outros locais da área do reservatório para detectar as fontes de poluição.

As amostragens referentes ao ano que antecede o enchimento, ou seja, ainda no sistema lótico, poderão ser feitas apenas com a água superficial ou, ainda, com amostras integradas. Já no decorrer do enchimento serão necessárias amostragens em diferentes profundidades, a fim de se verificar problemas relativos à anoxia, liberação de nutrientes, redução do pH, etc.

A frequência de coletas para esta fase deverá ser mensal. Exceção poderá ser feita às coletas para a verificação de mercúrio e de agrotóxicos, cujas amostras, nos locais acima indicados, poderão ser coletadas trimestralmente.

– Monitoramento de 2ª Fase

O monitoramento limnológico, conforme já mencionado, tem uma natureza dinâmica; nesta etapa este caráter poderá tornar-se ainda mais evidente, de forma a atender às necessidades que poderão surgir na ocasião. Além disto, deverá haver uma contínua reavaliação das metodologias em uso, com eventual modificação nos critérios adotados e incorporação de novas metodologias de análise.

Alguns experimentos, principalmente os relacionados ao crescimento de macrófitas aquáticas, poderão ser necessários, extrapolando o conceito de monitoramento e passando, inclusive, realizar trabalhos de pesquisa. Caso haja proliferação excessiva de macrófitas, pode ser necessária a proposição de estudos mais detalhados a esse respeito, bem como a implantação de medidas de controle.

Mesmo considerando o desmatamento dos braços, segmentos laterais e áreas de remanso do reservatório, é possível que haja desenvolvimento de macrófitas aquáticas. Caso estes vegetais estejam presentes em grandes quantidades (nesses ou em outros locais), a equipe de limnologia deverá não somente efetuar coletas de água, mas também de macrófitas, para permitir sua identificação.

Os dados limnológicos da fase reservatório deverão ser interpretados em conjunto com as demais informações a serem obtidas junto à operação da barragem. Assim, dados relativos ao volume d'água turbinada, água vertida, níveis d'água a montante e a jusante, quantidade e posição dos vertedouros em funcionamento, dentre outros, são essenciais na compreensão da estrutura e função limnológica do ecossistema em questão.

Além dos dados operacionais, os relatórios interpretativos deverão sempre considerar as características climatológicas e hidrológicas, como: incidência solar, ventos, precipitação, incidência e direção dos ventos, umidade do ar, vazão afluente e defluente, etc.

Os pontos de coleta previstos para esta etapa do monitoramento devem se situar no corpo principal do reservatório, na mais antiga calha do rio e um ponto situado a montante do remanso, cujo objetivo é o de avaliar a qualidade da água que entrará no reservatório, outro localizado imediatamente a montante da barragem, com o intuito de caracterizar as águas que passarão pelas turbinas. Além desses, devem ser previstos pontos de coleta nos segmentos laterais, incluindo afluentes, e pontos a jusante da barragem. Para os pontos de jusante, no rio, sugere-se a inclusão de amostragens em ambas as margens, visando detectar possíveis efeitos das águas turbinadas e vertidas pela barragem. Nas margens poderão ser determinados apenas alguns parâmetros, conforme descrito a seguir.

Para a seleção dos pontos de amostragem deverão ser consideradas as características morfométricas do reservatório, bem como a representatividade dos diferentes segmentos considerados nos estudos de modelagem matemática.

Os parâmetros a serem monitorados serão os mesmos listados no monitoramento de 1ª fase e mais: metais pesados, organo-clorados e organo-fosforados, nitrogênio total, produção primária.

Além destas determinações, possivelmente haverá necessidade de preparação de exsicatas para a identificação de macrófitas, bem como de observações diretas a respeito do crescimento desses vegetais.

No que se refere à produção primária, sugere-se que a mesma seja efetuada pelo método do oxigênio dissolvido. Como a determinação deste parâmetro depende da incubação “in situ” de amostras por quatro horas, normalmente das 10 às 14 horas, recomenda-se que este parâmetro seja monitorado em apenas dois locais, sendo um no corpo principal do reservatório, nas imediações da barragem, e outro no principal braço a ser formado pelo enchimento do reservatório.

Tanto as análises de metais pesados como as de agrotóxicos poderão ser feitas em amostras provenientes dos seguintes locais: do reservatório, a montante do remanso, das proximidades da barragem e do rio a jusante da barragem. Dependendo dos resultados a rede de amostragem poderá ser ampliada.

Quanto às coletas em ambas as margens do rio nos pontos situados a jusante da barragem, sugere-se que sejam analisados os seguintes parâmetros: cor, turbidez, temperatura, transparência, oxigênio dissolvido e condutividade. A determinação destes parâmetros, nestes locais, é considerada suficiente para avaliar as possíveis diferenças na qualidade da água que poderão ser detectadas em função das características do arranjo (posição do vertedouro, casa de força, etc) e das regras de operação.

A frequência de amostragem, pelo menos durante o primeiro ano e meio após a formação do reservatório, deverá ser mensal. A análise dos dados deste período permitirá o conhecimento das características limnológicas e das condições para a estabilização do novo ecossistema. Após este período, dependendo dos resultados e a partir de uma análise estatística, as coletas poderão passar de mensais para bimestrais .

Os parâmetros que serão determinados mais esporadicamente são:

- metais pesados, com coletas de água e de sedimento em apenas três pontos-amostras de água superficiais ou compostas (frequência trimestral ou semestral);
- organo-clorados e organo fosforados, com coletas de água e de sedimento em apenas três pontos – amostras de água superficiais ou compostas (frequência trimestral ou semestral).

Dependendo dos resultados, caso se constate a inexistência desses poluentes, essas coletas poderão ser suspensas.

A produção primária deverá ser determinada mensalmente, nas amostras retiradas nos locais próximos à barragem, ou seja, na antiga calha do rio, e no braço principal.

Quanto ao número de amostras por ponto de coleta, recomenda-se que para os locais com profundidade total de até quatro metros sejam obtidas amostras na superfície e no fundo; nos locais em que a profundidade máxima estiver compreendida entre quatro e nove metros, coletas na superfície, meio e fundo. Já para os locais com profundidade total superior a nove metros, as coletas deverão, preferencialmente, ser efetuadas de três em três metros.

A constatação de estratificação térmica na coluna d'água pode levar à necessidade de amostragens adicionais para a verificação de alguns parâmetros como, por exemplo oxigênio dissolvido, plâncton, nutrientes e clorofila.

Deve ser ressaltado o caráter dinâmico do monitoramento da qualidade da água, que deverá ser adaptado às condições ambientais vigentes, através da supressão ou acréscimo de pontos de coleta.

d) Responsável pela Implementação

A responsabilidade pela implementação deste programa é do Empreendedor, sendo necessária a participação de profissionais da área de Limnologia e de laboratórios especializados.

5.2.4.2 – Medidas Aplicáveis

As medidas disponíveis para evitar, controlar ou minimizar os problemas de qualidade da água em reservatórios podem ser de três tipos, em função de onde estarão sendo aplicadas: na bacia hidrográfica, no corpo do reservatório ou na vazão efluente. Todas essas medidas devem ser analisadas e incorporadas desde as fases iniciais dos estudos, já que um arranjo adequado das obras, por exemplo, pode eliminar diversos impactos sobre a qualidade das águas.

De preferência, devem ser adotadas medidas preventivas, visto que a tarefa de retorno de um ecossistema lacustre eutrofizado à estabilidade ecológica original é tecnicamente difícil e, às vezes, impossível. São necessários investimentos vultosos e a aplicação de um conjunto de medidas que visem, inclusive, a redução da eficácia da “fertilização interna”. É uma tarefa político-social a ser tratada no âmbito do órgão gestor da bacia hidrográfica.

a) Medidas aplicáveis à Bacia Hidrográfica

Essas medidas são do tipo preventivas, cuja função é de desviar a carga de nutrientes do reservatório, destacando-se dois tipos de fontes:

- Fontes Pontuais: se os nutrientes em questão provêm de fontes pontuais, como esgotos domésticos e industriais, pode-se desviar esses efluentes através de canais construídos no entorno do reservatório, com lançamento no rio a jusante da barragem. Ou então esses esgotos devem ser tratados para a eliminação do fosfato e nitrogênio, através de três estágios: mecânico (tratamento primário), biológico (tratamento secundário) e químico (terciário). No primeiro estágio a matéria sólida é decantada, no segundo conta-se com a atividade de microorganismos, especialmente os aeróbicos e, no terceiro estágio, eliminam-se o fosfato e o nitrogênio remanescentes, chegando a mais de 90% de redução do fosfato;
- Fontes Difusas: as medidas preventivas aplicáveis às fontes difusas são a redução do uso de fertilizantes agrícolas, a recomposição das matas ciliares ao longo dos afluentes e no entorno do reservatório e o controle da erosão na bacia e da carga de nutrientes carregada pela drenagem urbana.

b) Medidas aplicáveis a grandes reservatórios

- Arranjo

Os cuidados com a escolha do eixo e a distribuição das estruturas no arranjo já foram citados no início desse Capítulo.

– Desmatamento

Um dos fatores que interfere de forma significativa na qualidade da água é a inundação de formações florestais. A decomposição implica num consumo excessivo de oxigênio dissolvido, além da liberação de nutrientes, aumento da condutividade, diminuição do pH, etc.

Estudos recentes, realizados em laboratório, para a verificação dos efeitos da decomposição de vegetais (GADELHA; WATANABE; PASSERAT-DE-SILANS, 1990 apud THEMAG, 1998), e (MUCCI; ROCHA, 1998 apud THEMAG, 1998), corroboram os resultados obtidos em ensaios anteriores, permitindo concluir que durante a decomposição ocorre uma intensa liberação de substâncias solúveis na água. Os efeitos dessa liberação provocam elevação da cor que, por sua vez, pode alterar de forma significativa a penetração de luz na zona eufótica. Dentre os efeitos observados, Mucci e Rocha (1998) consideram que as alterações mais prejudiciais são devidas ao consumo de oxigênio dissolvido, uma vez que a concentração deste gás pode chegar a níveis críticos, comprometendo a sobrevivência dos peixes.

Por outro lado, a permanência de algumas áreas com vegetação beneficia a fauna de peixes, pois constituem-se em fonte alimentar para os herbívoros e abrigos para os forrageiros. Além disto, o desmatamento deverá ser feito de forma planejada para que não surjam áreas marginais desnudas de vegetação.

Dependendo das dimensões do reservatório, pode-se tornar inviável a limpeza prévia integral da área. A remoção da vegetação terrestre será, então, priorizada nos locais onde se formarão os principais braços do reservatório, já que, nestes locais, são esperadas as situações mais críticas de qualidade da água.

As especificações a respeito da retirada da vegetação estão apresentadas no Programa de Desmatamento e Limpeza do Reservatório apresentado no item 5.2.1.2.

O desmatamento, mesmo que parcial, contribuirá para o aumento da vida útil do reservatório e para a manutenção da qualidade ecológica e sanitária da água.

c) Medidas aplicáveis a pequenos Reservatórios e Açudes

Quando o processo de eutrofização já se encontra em estado avançado, são necessárias medidas para “Recuperação de Lagos”, medidas corretivas, preconizadas após uma pesquisa limnológica detalhada, e que devem ser associadas à medidas preventivas. As medidas corretivas podem ser de três tipos: físicas, químicas e biológicas. Em muitos casos são combinadas várias medidas para a recuperação do lago (ESTEVES, 1988).

– Métodos Físicos:

- Retirada seletiva de massas d’água. A água do hipolímnio, mais fria, rica em nutrientes e pobre em oxigênio, é retirada por mangueiras, pelo princípio dos vasos comunicantes. No seu lugar, entra a água do metalímnio ou do epilímnio, mais quente, com maior teor de OD e menor concentração de nutrientes. A água retirada pode ser aproveitada na irrigação, conforme Figura 5.2.9 a seguir.

Figura 5.2.9 – Retirada Seletiva de Massas d’Água

Fonte: ESTEVES, 1988

- Aeração do lago. A aeração da camada inferior do lago visa manter o fósforo contido nos sedimentos na sua forma insolúvel. Pode-se aerar apenas o hipolímnio, apenas o epilímnio ou toda a coluna d'água do lago. No primeiro caso, aplicável a reservatórios profundos, com mais de 8 m de profundidade, a intenção é aerar a região inferior sem misturar as camadas, no caso de reservatórios que estratificam, pois a mistura traria a suspensão de nutrientes do fundo até a zona de luz, aumentando a produção primária e agravando a eutrofização. A mistura elevaria a temperatura do hipolímnio e, em consequência, aumentaria a taxa de decomposição e o déficit de oxigênio. É empregado um aparelho com duas câmaras, colocado no fundo do lago, com um compressor nas margens, conforme Figura 5.2.10 a seguir. É um método caro, que se aplica apenas a lagos pequenos.

Figura 5.2.10 – Aeração do Hipolímnio

Fonte: ESTEVES, 1988

No caso de lagos rasos, de menos de 7 m de profundidade, que não estratificam termicamente ou cuja estratificação possa ser desprezada, é mais adequado aerar toda a coluna d'água, por meio de mangueiras colocadas no fundo, conforme Figura 5.2.11 a seguir.

Figura 5.2.11 – Aeração de Lagos Rasos por Meio de Mangueiras

Fonte: ESTEVES, 1988

A aeração do epilânio é aplicada para inibir o crescimento de fitoplâncton, através da mistura de uma camada mais espessa que a região eufótica, onde ocorre a fotossíntese, com vistas a minimizar a produção líquida de fitoplâncton.

- Remoção do sedimento por sucção. Tendo em vista que o sedimento é o principal armazenador de nutrientes de um lago, sua retirada é um mecanismo eficiente para reduzir a “fertilização interna”; aplicável a lagos rasos, devido, inclusive, aos altos custos do procedimento. Na Figura 5.2.12 a seguir tem-se detalhes do procedimento: o sedimento é retirado por balsa de sucção (1) e lançado em tanque de sedimentação (2). A água retirada junto com o sedimento é encaminhada por conduto (3) até uma estação de tratamento, onde recebe sulfato de alumínio (4a), é aerada (4b) e colocada em tanque para precipitação do fosfato (4c). O fosfato é retirado (4d) e a água retorna para o lago (5), enquanto que o sedimento é utilizado em hortas, jardins, etc (6).

Figura 5.2.12 – Remoção de Sedimentos por Sucção

Fonte: ESTEVES, 1988

- Retirada de macrófitas aquáticas. Consiste na retirada da biomassa aérea e subterrânea de macrófitas, que proliferam de maneira exagerada nos reservatórios eutrofizados e reduzem sua profundidade e qualidade.
 - Retirada da biomassa planctônica. As algas armazenam nutrientes e sua retirada através de micropeneiras ou por centrifugação de grandes volumes de água pode dar bons resultados; aplicável a lagos pequenos.
 - Sombreamento. Consiste na redução do crescimento de algas e macrófitas por meio de anteparos, corantes ou plantio de árvores nas margens do corpo d'água, visando reduzir a incidência de radiação solar; aplicável apenas a lagos pequenos.
 - Redução do tempo de residência da água. Provoca a redução da biomassa de algas, mas depende da disponibilidade hídrica do reservatório e dos riscos de enchentes a jusante.
- Métodos Químicos
- Oxidação química dos sedimentos. Através da introdução, nos sedimentos, de solução de ferro, seguida pela neutralização do pH e pela oxidação da matéria orgânica, conforme Figura 5.2.13.

Figura 5.2.13 – Oxidação Química dos Sedimentos

Fonte: ESTEVES, 1988

- Emprego de herbicidas. Utiliza-se o sulfato de cobre ou oxidocloreto de cobre para controle de algas, por serem pouco tóxicos para os invertebrados e vertebrados aquáticos.
 - Floculação. Para floculação de algas e demais compostos suspensos na água, utiliza-se sulfato de alumínio ou sais de ferro, cálcio ou zinco.
 - Inativação de nutrientes por precipitação. É o mesmo princípio da floculação, agindo em especial sobre o fosfato, retirando-o da coluna d'água ou controlando sua liberação do sedimento.
 - Cobertura do sedimento. Com argila, como forma de reduzir a fertilização interna do reservatório.
- Métodos Biológicos

O controle de algas e de macrófitas aquáticas pode ser realizado através de herbívoros e de agentes patogênicos. No primeiro caso tem-se a ação do zooplâncton, moluscos (caramujos) e peixes (carpa e tilápia), que se alimentam de macrófitas aquáticas, conforme Figura 5.2.14. A introdução desses herbívoros pode trazer conseqüências danosas para as comunidades autóctones e, como atuam na movimentação dos sedimentos do fundo, podem agravar a eutrofização. A eficiência da utilização de agentes patogênicos, como fungos, bactérias e vírus ainda não está bem comprovada. Plantas aquáticas como o aguapé também têm sido utilizadas no controle da eutrofização, com resultados discutíveis.

Figura 5.2.14 – Utilização de Peixes (Carpa Ou Tilápia) para Controle das Macrófitas
Fonte: ESTEVES, 1988

d) Medidas aplicáveis à água efluente

– Arranjo

No estudo de arranjo pode-se otimizar a posição da Casa de Força, de modo que a água efluente possa ser oxigenada logo à saída do Canal de Fuga. Para tanto, pode-se estudar um arranjo com vertedouro entre dois blocos da Casa de Força ou a implantação de soleiro no rio, a jusante. Nesse caso, a medida deve ser temporária, já que haverá redução na queda, e conseqüentemente, na energia gerada.

– Tomada d'água seletiva

Uma das mais baratas opções para melhorar a qualidade da água de reservatórios envolve a regulação hidráulica, que é escolher a camada de melhor profundidade, ao longo do tempo, para a retirada da água a ser lançada para jusante ou consumida. É uma solução usual para tomadas d'água de sistemas de abastecimento, mas de aplicação mais complexa no caso de tomadas para geração hidrelétrica. É uma providência a ser contemplada na fase de projeto, podendo-se prever aberturas múltiplas com tubos de saída espaçados verticalmente a cada 5 m, por exemplo, ou, no mínimo, duas saídas, uma mais superficial e a outra mais profunda.

A operação de tomadas desse tipo apresenta aspectos positivos e negativos:

- a saída superficial pode ser usada para escoar algas em excesso do epilímnio, mas vai aumentar a concentração de fósforo nas camadas superficiais do reservatório;
- a saída inferior pode ser usada para lançar a água do hipolímnio, pobre em oxigênio e rica em fósforo, ferro e manganês, melhorando a qualidade do reservatório e reduzindo o risco de eutrofização, mas pode reduzir a estratificação térmica;

- criando uma corrente de densidade, um pico de vazão afluyente rica em fósforo (no início das chuvas, por exemplo), pode passar rapidamente pelo reservatório. Por outro lado, camadas com turbidez elevada podem atingir tomadas de água para abastecimento.
- combinação de fluxos, tomando água de duas camadas distintas, a superior, com água mais quente, de elevado teor de OD e melhor qualidade, e a inferior, com água mais fria e de pior qualidade. A combinação permite o controle da temperatura da água lançada a jusante, que pode ser fundamental para a sobrevivência de algumas espécies de peixes.

Na Figura 5.2.15 a seguir tem-se um exemplo de tomada com comporta móvel, atendendo à variações do NA do reservatório e captando sempre a água de melhor qualidade. Na Figura 5.2.16 tem-se um exemplo de tomada d'água rasa, com dispositivo anti-vórtices.

Figura 5.2.15 – Tomada d'Água com Comporta Adaptável ao NA

Figura 5.2.16 – Tomada d'Água com Viga Anti-vórtice

Caso a solução em tomada seletiva não se apresente viável para grandes empreendimentos hidrelétricos, dado o conflito de interesses, já que a água superficial é melhor do ponto de vista de qualidade da água e a profunda é melhor do ponto de vista da geração, ao menos deve-se estudar o melhor arranjo das obras, de forma que, à saída da Casa de Força, haja uma topografia favorável, que possibilite a aeração natural do fluxo. Ou então deve-se prever aeração artificial desse fluxo ou mistura periódica com águas superficiais do reservatório, através da operação do vertedouro.

e) Exemplos de solução para problemas de qualidade da água – Manejo do Reservatório

O compromisso da ELETRONORTE em 1986 era gerar 1.300 MW na UHE Tucuruí, correspondente à 2.000 m³/s de vazão turbinada, maior que a vazão afluente mínima prevista para aquela estiagem. Para solucionar o problema foram analisadas três alternativas de manejo do reservatório, que possibilitassem o atendimento à geração, sem comprometer a qualidade ambiental do trecho do rio a jusante e do próprio reservatório:

- Alternativa 1: fixava a relação entre a vazão turbinada e a vazão total efluente em 0,55, resultante dos estudos relativos à estiagem de 1985, para manutenção da qualidade adequada da água liberada para jusante. Para tanto, admitia operar continuamente o vertedouro e a possibilidade de deplecionar o reservatório em 6 m, até a cota 66 m. Essa alternativa apresentava possíveis consequências indesejáveis ao reservatório, como: a rebrota da vegetação em 15 % da área de inundação e mortandade das macrófitas aquáticas concentradas nas margens do lago, portanto mais massa orgânica a ser decomposta, com eventuais problemas de anaerobiose e de excessiva disponibilidade de nutrientes. Outras possíveis consequências seriam o aumento da proliferação de insetos em lagoas de águas estagnadas, interrupção das condições de acesso ao reservatório aos habitantes das margens, interrupção do abastecimento de água, prejuízos à ictiofauna, etc;
- Alternativa 2: fixava a cota do NA do reservatório em 72 m, mantendo as condições ambientais existentes no seu corpo e margens, mas comprometendo o rio a jusante, pela diminuição e interrupção do vertimento por até 30 dias. Como consequência ter-se-ia, nesse período, cerca de 8 km até a cidade de Tucuruí com OD próximo de zero, nos 40km seguintes, até Nazaré do Patos, concentração menor que 4 mg/l, possibilidade de mortandade de peixes, comprometendo a subsistência da população ribeirinha, prejuízos ao abastecimento da população, etc;

- Alternativa 3: critério operativo variável, ditado pelo monitoramento intensivo e contínuo das condições ambientais, de forma a não comprometer o reservatório, nem o rio a jusante. Como ponto de partida foi adotada a relação 0,55 para as vazões turbinada e efluente total, podendo-se elevar essa relação gradativamente, caso os resultados obtidos no monitoramento o permitissem, de forma a evitar o deplecionamento de 6 m do reservatório.

Escolhida a última dessas alternativas, foi iniciado o monitoramento da qualidade da água em seis estações, cinco a jusante e uma no reservatório, registrando: OD, pH, temperatura, condutividade e coliformes. Além desses parâmetros, foram analisadas as demais consequências vinculadas à Alternativa 1, resultantes do deplecionamento do reservatório.

Com base no monitoramento, foi possível aumentar gradativamente a relação Q_{turb}/Q_{total} até atingir 0,80. Graças à essa relação e às condições hidrológicas favoráveis, o deplecionamento máximo do reservatório foi limitado à apenas 1 m, o que praticamente eliminou os impactos no reservatório decorrentes do deplecionamento.

O comportamento da camada anóxica no reservatório foi bastante semelhante nos dois períodos de estiagem avaliados (1985 e 1986), conforme Figura 5.2.17 a seguir.

Figura 5.2.17 – Evolução da Camada Anóxica

Fonte: BASTOS; ARAÚJO; FORTES, 1987

A jusante, a concentração de OD na margem esquerda abaixou de 2 mg/l, correspondente à relação Q_{turb}/Q_{total} de 0,50, para valores inferiores a 1 mg/l, a partir do dia em que a relação atingiu o valor de 0,60. Na margem direita a concentração abaixou de 8 mg/l para 6 mg/l, correspondente às relações de 0,50 e 0,80, respectivamente.

Na Figura 5.2.18 a seguir tem-se o perfil longitudinal do teor de OD entre a barragem e a vila de Nazaré dos Patos, 48 km a jusante, para a relação Q_{turb}/Q_{total} de 0,72, comprovando que a homogenização dos teores só ocorreu a mais de 50 km da barragem. Quanto aos demais aspectos e parâmetros da qualidade da água monitorados, não ocorreram variações sensíveis durante o período.

Figura 5.2.18 – Evolução dos Teores de OD no Trecho a Jusante de Tucuruí

Fonte: BASTOS; ARAÚJO; FORTES, 1987

f) Exemplo de Recuperação de Reservatório

O lago Paranoá foi construído em 1959 para permitir recreação aos habitantes de Brasília, melhorar as condições climáticas e gerar energia elétrica. Logo após sua criação, a qualidade da água começou a mudar e o reservatório se tornou rapidamente eutrófico, com a ocorrência de intensas florações de algas “*Microcystis Aeruginosa*” (ALTAFIN et al, 1995). Um desses eventos se deu em 1978 no braço sul do lago. Vários fatores, como a construção da cidade na bacia contribuinte, seu rápido crescimento, a instalação de duas plantas inadequadas

para tratamento de esgotos, com tratamento apenas a nível secundário, em dois braços do lago e a falta de medidas de recuperação, contribuíram para o processo.

Os principais problemas que existiam no lago Paranoá podem ser resumidos em três aspectos: eutrofização, sedimentação e contaminação das águas. Na Tabela 5.2.4 a seguir constam esse aspectos.

Tabela 5.2.4 – Problemas de Qualidade da Água no Lago Paranoá

Eutrofização	Altas concentrações de nutrientes
	Alta produtividade primária com predominância de Cianofíceas
	Presença de macrófitas aquáticas
	Baixa transparência da água
	Floração ocasional de algas azuis
	Mortandade ocasional de peixes
	Liberação de gás sulfídrico e metano
	Produtividade secundária elevada, com a predominância de rotíferos
	Alta produtividade de peixes com a predominância de espécies exóticas
	Falta de oxigênio no hipólímnio
	Enriquecimento do sedimento
Sedimentação	Perda de volume d'água no lago
	Altas taxas de sedimentação
Contaminação	Altos níveis de coliformes fecais
	Sobrevivência de organismos patogênicos na água
	Proliferação de vetores e mosquitos

Fonte: ALTAFIN et al, 1995

As principais causas da deterioração da água eram: desmatamento incompleto da área inundada; descarga de esgoto sem tratamento ou tratado de forma inadequada; transporte pelos tributários e pela água das chuvas de fertilizantes, esgotos e outros tipos de substâncias contaminantes; posicionamento das estações de tratamento de esgotos nos braços do lago; morfometria geral do lago; alto tempo de residência (299 dias); alta densidade urbana na bacia hidrográfica; bacia não protegida; barragem sem descarregador de fundo; falta de educação ambiental; alta razão entre a área da bacia hidrográfica e a área superficial do lago (26:1).

Desde 1970, portanto ao longo de 20 anos, foram realizadas dezenas de estudos e pesquisas, que permitiram estabelecer um programa de recuperação, focado, principalmente, na redução da carga externa de nutrientes, pela coleta e tratamento terciário dos esgotos produzidos na bacia de contribuição. Os programas de recuperação do Lago Paranoá foram divididos em três estágios, compreendendo: ações emergenciais, de longo termo e complementares. Como medidas emergenciais foram adotadas: controle do crescimento de algas pelo uso do sulfato de cobre a partir de 1978; controle de macrófitas aquáticas por remoção mecânica a partir de 1986; redução de nutrientes nas estações originais de tratamento secundário de esgotos, pela aplicação de sulfato de alumínio nos efluentes, entre 1983 e 1989.

As medidas de longo termo foram: políticas específicas de uso dos solos; coleta e tratamento dos esgotos, envolvendo a construção de estações de bombeamento, interceptores, condutos e duas novas estações de tratamento terciário.

Outra medida de longo termo avaliada, mas não implementada pelo custo elevado, foi a redução de nutrientes provenientes de fontes difusas, contidos nas águas de drenagem.

As medidas complementares em fase de estudo, que acabaram sendo descartadas, eram: aeração: sem misturar as camadas estratificadas ou misturando-as; biomanipulação: introdução da carpa prateada no lago para reduzir a biomassa de fitoplâncton e a produtividade primária líquida; rebaixamento do NA do lago; ações ambientais locais: educação sanitária da população.

As novas estações de tratamento terciário de esgotos começaram a operar em 1993, resultando numa redução do aporte externo médio anual de fósforo ao lago de 400 kg/l em 1992 para 150 kg/l em 1994. Contudo, os efeitos sobre as concentrações de fósforo total no lago não responderam de forma tão imediata à redução nas afluentes, devido ao pouco tempo de observação disponível na ocasião (1994) e também à “fertilização interna” do lago, pelos nutrientes acumulados nos sedimentos. Outros fatores, no entanto, indicavam uma melhoria na qualidade da água, como a redução de áreas com floração de algas, que permitiu uma redução na quantidade de sulfato de cobre aplicado como algicida, e o aumento de áreas propícias para banho.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente Dissertação mostrou um panorama das grandes barragens existentes no Brasil e no mundo, a evolução da questão ambiental e a situação atual, especialmente quanto aos Aspectos Legais e Institucionais, e as fontes alternativas de água e energia e respectivos impactos.

Dentre os impactos de reservatórios, essa Dissertação procurou analisar os que afetam o Meio Físico, em especial o Clima, os Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos, os Terrenos e a Qualidade das Águas. Alguns aspectos foram detalhados com maior profundidade e outros foram apenas mencionados. Dentre os primeiros tem-se a emissão de gases de efeito estufa por reservatórios, o assoreamento de reservatórios e a erosão do leito do rio a jusante, a influência de reservatórios sobre as águas subterrâneas e sobre os terrenos marginais, a sismicidade induzida por reservatórios e os efeitos sobre a qualidade das águas no reservatório e a jusante das barragens.

Entre as atividades envolvidas numa obra de barramento de rio e formação de reservatório, foram elencadas, como possíveis indutoras de impactos ambientais, todas as fases de planejamento das obras, desde a fase de divisão de quedas, escolha do local, até a definição dos parâmetros principais da obra, do arranjo, altura das tomadas d'água, etc. A seguir foram apresentadas algumas medidas de eficácia comprovada na atenuação dos impactos, como: desmatamento da área a ser inundada, como forma de reduzir a produção de gases de efeito estufa e melhorar as perspectivas para a qualidade da água a ser reservada; medidas para controle dos sedimentos que afluem ao reservatório e para controle das erosões a jusante do reservatório; soluções para atenuar ou conviver com a elevação do lençol freático; o tratamento de áreas degradadas e, por fim, medidas de prevenção ou recuperação da qualidade da água reservada e da que é liberada para jusante.

Para os demais aspectos, que não são passíveis de medidas atenuantes, foram apresentados programas de monitoramento ambiental, com vistas ao acompanhamento de sua evolução, para, a partir da análise dos dados, ser possível tomar medidas corretivas ou compensatórias adequadas. O monitoramento ambiental

a longo prazo também poderá contribuir com futuros projetos de reservatórios, permitindo adiantar providências ainda na fase de projeto e implantação das obras.

Como conclusão dos tópicos apresentados, tem-se que, nos países em desenvolvimento que dispõe de recursos hídricos em abundância, como a China e o Brasil, é menor a probabilidade de que outra alternativa tecnológica resulte em solução técnica e economicamente mais favorável para a obtenção de água e energia do que a construção de barragens.

Os impactos negativos decorrentes da criação de reservatórios podem ser eliminados ou minimizados, seja na fase de planejamento, pela escolha adequada da posição da barragem, da disposição das estruturas no arranjo, da definição das cotas das estruturas, seja na fase de implantação, pela adoção de medidas para atenuar ou compensar os impactos remanescentes.

Dentre os impactos positivos tem-se que a construção de barragens promove o desenvolvimento regional, a criação de empregos, tanto na agricultura irrigada, quanto nas indústrias que venham a se utilizar da água ou da energia gerada. Proporciona o aumento de renda, com exportações de excedentes agrícolas, de produtos industrializados e da própria eletricidade. Integra regiões isoladas, pela indução da criação de novas rodovias e hidrovias, e reduz os danos provocados por enchentes e inundações.

Portanto, o equacionamento e solução adequada para os impactos negativos nos meios físico, biótico e sócio-econômico, pode conduzir a barragens que sejam bastante aceitáveis também do ponto de vista ambiental. Dessa forma, será possível responder às pressões dos organismos internacionais, sem comprometer o processo de desenvolvimento dos países, em especial o do Brasil.

LISTA DE REFERÊNCIAS

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Diretrizes para Execução de Sondagens**. São Paulo, 1990.

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Ensaio de Permeabilidade em Solos**. Orientação para sua execução no campo. 3ª Ed. São Paulo, 1996.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem**. NBR 13895. Rio de Janeiro: ABNT, 1977, 21p.

AGOSTINHO, A.A.; VAZZOLER, A.E.A.M.; THOMAZ S.M. The High River Paraná Basin – Limnological and Ichthyological Aspects. In: TUNDISI, J. G.; BICUDO, C. E. M.; MATSUMURA TUNDISI, T. **Limnology in Brazil**. São Paulo: Brazilian Academy of Sciences / Brazilian Limnological Society, 1995. p. 59-103.

ALBUQUERQUE Filho, J.L. **Previsão e Análise da Elevação do Nível do Lençol Freático na Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) de Reservatórios Hidrelétricos**. 2002. 231 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2002.

ALTAFIN, I.G. et al. Paranoá Lake – Limnology and Recovery Program. In: (Editores): TUNDISI, J.G., BICUDO, C.E.M.; MATSUMURA TUNDISI T. **Limnology in Brazil**. Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995. p. 325-349.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 1ª Edição. Brasília. 2002. Disponível em www.aneel.gov.br. Acesso em: 5 de maio de 2003.

BARBOSA, F.A.R. et al. The Cascading Reservoir Continuum Concept (CRCC) and its Application on the River Tietê Basin, São Paulo State, Brazil. In: TUNDISI, J.G., STRASKRABA, M. **Theoretical Reservoir Ecology and Its Applications**. São Paulo: Brazilian Academy of Sciences / IIE /Bachnuys Publishes, 1999. p. 425-437.

BASTOS, U.P.; ARAÚJO, A.L.; FORTES, J.A.M. Efeitos Ambientais Associados à Operação da UHE Tucuruí, durante o período de estiagem de 1986. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, III SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, Salvador, 1987. **Anais**. Salvador: ABRH/APHRH, 1987. p. 96-107.

BCOLD – Brazilian Committee on Large Dams. **Main Brazilian Dams – Design, Construction and Performance**. São Paulo: BCOLD Publications Committee, 1982. 653 p.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 1ª Edição. São Paulo: Prentice Hall; 2002. 305 p.

BRASIL. MP 2166-67, Presidência da República, Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Medida Provisória nº 2166-67, de 24/08/2001, altera o Código Florestal.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 1**, de 23/01/1986(a). Brasília: Senado Federal, 1997. 670 p.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 11**, de 18/03/1986(b). Brasília: Senado Federal, 1997. 670 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Energia. **Balanco Energético Nacional 2003**. Brasília: MME, 2003. 168 p.

CANTER, L.W. **Environmental Impact of Water Resources Projects**. 2ª Edição. Michigan: Lewis Publishers, 1986. 352 p.

CANTER, L.W.; VLACHOS, E. **Avaliação de Impactos Ambientais de Reservatórios**. Curso promovido por: ABRH/EPUSP/FCTH. São Paulo, 1991. Não publicado.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de Avaliação de Assoreamento em Reservatórios**. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 132 p.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - e ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Rio de Janeiro: CPRM, 1994. 372 p.

CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. **Cadastro de Barragens**, 2003. Disponível em: www.cbdb.org.br. Acesso em 12 de maio de 2003.

CBGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. **Barragens no Brasil**. São Paulo: Novo Grupo Editora Técnica Ltda, 1982.

CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL. **Memória da Eletricidade**. Caminhos da Modernização, Cronologia do Setor de Energia Elétrica Brasileiro, 1850-1998. Rio de Janeiro, 1999. 1 CD-ROM.

CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL. **Memória da Eletricidade**. Usinas de Energia Elétrica no Brasil, 1880-1930. Banco de Imagens. Rio de Janeiro, 1996. 1 CD-ROM.

CESTARI Junior, E.; CELERI, A. Reflexos do Enchimento do Reservatório da UHE Três Irmãos nas Edificações da cidade de Pereira Barreto. In: XXIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Belo Horizonte, 1999. **Anais**. Belo Horizonte: CBGB, 1999. p. 79-86.

COSTA, H.A. Avaliação Sismológica para os Projetos de Engenharia. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA, São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 177-190.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica. Disponível em www.daee.sp.gov.br. Acesso em 30 de abril de 2003.

DE VINCENZO Júnior., M.C. **Instabilizações e Recuos de Margens de Reservatórios – Análise de Indicadores Físicos**. 2003. Dissertação não Publicada (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras contra as Secas – **Barragens no Nordeste do Brasil** – Experiência do DNOCS em barragens na região semi-árida – Fortaleza, 1982.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras contra as Secas. Disponível em: www.dnocs.gov.br. Acesso em 30 de abril de 2003.

DONADON, J.M. Soluções Alternativas à Construção de Barragens. In: XXIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Belo Horizonte, 1999. **Anais**. Belo Horizonte: CBGB, 1999. p. 87-91.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Diretoria de Planejamento e Engenharia. **Diagnóstico das Condições Sedimentológicas dos Principais Rios Brasileiros**. UFRGS/IPH – Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1992. 100 p.

ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.. **Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas**. v.1. Metodologia. Brasília, 1997.

ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil. **Usina Hidrelétrica Tucuruí. Memória do Empreendimento**. v.8, 1988. Brasília: ELETRONORTE, 1988. 287 p.

EPA – Environmental Protection Agency. **The Lake and Reservoir Restoration Guidance Manual**. 2ª Edição. Washington: U.S. EPA, 1990. 326 p.

ESTEVES, F.A. e BARBOSA, F.A.R. Eutrofização Artificial – A Doença dos Lagos. **Ciência Hoje**, v.5, nº 27, p. 56, 1986.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência/FINEP, 1988. 575 p.

FROELICH, C.G.; ARCIFA, M.S. **An oligomitic Man – Made Lake in Southeastern Brazil**. Stuttgart: Verh. International Verein. Limnology. 1984. p. 1620-1624.

GAGNON, L. IRN Statement on emission from hydro reservoirs: A case of Misleading. **Science Hydropower & Dams Issue Four**, 2002.

GARRIDO, R.A Sustentabilidade das Intervenções no Ambiente Aquático. In: WORKSHOP ON DAMS, DEVELOPMENT AND THE ENVIRONMENT. São Paulo, 2000. **Barragens, Desenvolvimento e Meio Ambiente**. São Paulo. 2000. p. 7-16.

HABERHLENER, H. Evolução do Conhecimento Sismológico no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA, São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 1-7.

HASUI, Y. Quadro Geotectônico e Estrutural da Sismicidade Natural. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA, São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 9-13.

HENRY, R. Heat Budgets, Thermal Structure and Dissolved Oxygen in Brazilian Reservoirs. In: TUNDISI, J.G.; STRASKRABA, M. **Theoretical Reservoir Ecology and its Applications**. São Paulo: IIE/Brazilian Academy of Sciences / Bachnuys Publishers, 1999. p. 125-151.

IWPDC – International Water Power and Dam Construction, 1993. Disponível em: www.connectingpower.com. Data de acesso: 24/09/2003.

JENSEN, P.D. **Impactos de Reservatórios no Meio Ambiente**. São Paulo, EDUSP, Agosto/2002. Palestras proferidas no curso de pós graduação do Departametro de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2002.

KNUEPFER, P.L.; PACKER, D.R.; WITHERS R.J. An Analysis of Reported Cases of Reservoir Induced Seismicity and the Potential for Future Occurrences. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA. São Paulo, 1979, **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 69-106.

MARGALEF, R. **Limnologia**. Barcelona: Ediciones Omega, S.A., 1983. 1.010 p.

MENDIGUREN, J.A. Estudos sobre Sismicidade Induzida desenvolvidos na UnB. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA. São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 49-67.

NEWMAN, G. Insight – Cleaning up Hydro's Act. **Internacional Water Power and Dam Construction**. Dartford, UK. v. 52, n. 8, Pages 14 and 15, August 2000.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Evaporações Líquidas nas Usinas Hidrelétricas**. Relatório RE 3/159/2001 emitido pela Gerência de Planejamento da Operação, Rio de Janeiro, 2001.

PACKER, D. R. et al. Reservoir Induced Seismicity. Association with active faulting at Selected Reservoir. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA. São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 107-149.

PALMIER, L. R. **Os Impactos Ecológicos das Grandes Barragens Hidrelétricas**. Projeto de Fim de Curso. Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1987. 153 p.

PORTO, M. F. A. **Sensibilidade de Modelos de Estratificação Térmica em Reservatórios a Dados de Radiação Solar**. 1991. 204 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1991.

PORTO, M. F. A. **Qualidade da Água**. Anotações de Aula do Curso de Pós Graduação. 2000. São Paulo. EDUSP, 2000.

RAYNOV, S ; PECHINOV, D.; KOPALIANY, Z. **River Response to Hydraulic Structures**. Edited by: Hey R. D. Paris: Unesco, 1986.

ROSA, L. P. et al. Greenhouse Gases Emission in Tropical Regions: Comments on the International Rivers Network Report IRN. In: 70th ANNUAL MEETING OF ICOLD, Foz do Iguaçu, 2002. Rio de Janeiro: IVIG/COPPE/UFRJ, 2002.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em www.sabesp.com.br. Acesso em 30 de maio de 2003.

SALAS, H.J.; MARTINO, P. Desarrollo de Metodologias Simplificadas para La Evaluacion de Eutrofication em Lagos Calidos Tropicales. In: IV ENCUESTRO DEL PROYECTO REGIONAL, San Juan de Puerto Rico, 1987. **Memória**. San Juan: CEPIS/JCA, 1988, 28 p.

SÁNCHEZ, L.E.; DIAS, E.G. **Avaliação de Impacto Ambiental**. São Paulo. EDUSP, abril/2002. Curso de Treinamento Tecnológico. Cooperação Universidade Empresa. Projeto Atual-Tec/CECAE-USP. São Paulo, 2002.

SANTOS, A.H.M.; FREITAS, M.A.V. Hidrelétricas e Desenvolvimento no Brasil. In: WORKSHOP ON DAMS, DEVELOPMENT AND ENVIRONMENT. São Paulo, 2000, **Barragens, Desenvolvimento e Meio Ambiente**. São Paulo, 2000. p. 59-75.

SANTOS, M. A. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Hidrelétricas**. 2000. 147 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2000.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. 1ª Edição, Rio de Janeiro. Editora Edgard Blücher Ltda. e Engevix S.A. Estudos e Projetos de Engenharia. 1977. 238 p.

SEMINÁRIO: Abastecimento de Água da Macro Região de São Paulo: Perspectivas a Curto, Médio e Longo Prazo. São Paulo, 2003. Disponível em: www.ie.irg.br. Acesso em: 24/11/2003.

SHAYANI, S. Sismos Induzidos. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE NATURAL E INDUZIDA. São Paulo, 1979. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1979. p. 15-47.

SKINNER, B.J.; TUREKIAN, K.K. **O Homem e o Oceano**. Série de Textos Básicos de Geociência. São Paulo: Ed. Edgar Blucher/Ed. da USP, 1977.

STARA, V. et al. Problems and Methods of Solution of Reservoir Bank Erosion. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RESERVOIR MANAGEMENT IN

TROPICAL AND SUB-TROPICAL REGIONS. Iguassu, 2002. **Anais**. Iguassu: CBDB/ICOLD, 2002. p. 729-738.

STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G.; DUNCAN, A. State-of-the-art of Reservoir Limnology and Water Quality Management. In: STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G.; DUNCAN A. **Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management**. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 213-288.

THEMAG, Engenharia e Gerenciamento S/C Ltda. **EIA/RIMA da UHE de Lajeado**, São Paulo, 1996.

THEMAG, Engenharia e Gerenciamento S/C Ltda. **EIA/RIMA do Aproveitamento Hidrelétrico Peixe**. São Paulo, 2000.

THEMAG, Engenharia e Gerenciamento S/C Ltda. **PBA da UHE de Lajeado**. São Paulo, 1998.

THEMAG, Engenharia e Gerenciamento S/C Ltda. **PBA do AHE Peixe Angical**. São Paulo, 2002.

TUCCI, C. E. M. (Organizador). **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/EDUSP/ABRH, 1993.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA TUNDISI, T.; CALIJURI, M. C. Limnology and Management of Reservoir in Brazil. In: STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN A. **Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management**. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 25-55.

TUNDISI, J.G. Ambiente, Represas e Barragens. **Ciência Hoje**, v.5, nº 27, p. 49, 1986.

VON SPERLING, E. **Morfologia de Lagos e Represas**. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 1999. p. 57-134.

WCD. The World Comission on Dams. **Barragens e Desenvolvimento: Um Novo Modelo para Tomada de Decisões – O Relatório da Comissão Mundial de Barragens – Um Sumário.** 2000. Disponível em www.dams.org. Data de acesso: 03/11/2003

WCD. The World Comission on Dams. **Dams and Development – A New Framework for Decision-Making – The Report of the Commission on Dams.** Thematic Reviews II. Dams and Global Change, Parts II and III. Disponível em www.dams.org. Data de acesso: 10/11/2003.

WCD. The World Comission on Dams.. **Dams and Development – A New Framework for Decision-Making – The Report of the Commission on Dams.** London and Sterling, VA, USA – Earthscan Publications Ltd. 2000. 404 p.

GLOSSÁRIO

ADA: área diretamente afetada pelo Empreendimento, composta pelo reservatório, obras civis e de apoio, etc.

Agradação: depósito de sedimentos no leito do rio

AI ou AII: área de influência (ou área de influência indireta), que corresponde aos municípios que terão parcelas de seu território inundadas pelo reservatório.

Albedo: reflexão da energia solar pela superfície da terra e nuvens.

Ambiente Lântico: Típico de lagos

Ambiente Lótico: Típico de rios

Ambiente Oxidante: com OD.

Ambiente Redutor: sem OD.

Anóxica: sem oxigênio.

Antropogênico: decorrente da ação do homem; atividade exercida pelo homem.

Bentos: do grego benthos, que significa profundidade; comunidade de animais invertebrados e bactérias que se desenvolve no fundo dos lagos.

Biomassa (biólogico): é o peso total de todos os indivíduos de uma população ou comunidade, por unidade de área ou de volume, num dado tempo. Pode ser expressa em termos de número de indivíduos, pigmentos, peso seco, carbono orgânico, nitrogênio orgânico, energia (joule) e adenosina trifosfato (ATP) (Esteves, 1988).

Biomassa (energético): toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser usada a produção de energia. Exemplo: resíduos da cana-de-açúcar, galhos de árvores, resíduos de madeira, óleos vegetais, resíduos agrícolas, etc.

Biota: flora e fauna

DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio): significa a quantidade (em mg) de oxigênio retirada da água pelos decompositores, para decompor a matéria orgânica existente em 1 litro de água (Padrão é a $DBO_{5,20}$ – amostra diluída deixada em estufa por 5 dias a 20° C).

Degradação: erosão do leito do rio

Deplúvio: lavagem da bacia

Epicentro: projeção, na superfície, do “hipocentro” do terremoto

Epilímnio: camada superior de lagos e reservatórios, mais quente, mais turbulenta e com temperatura aproximadamente uniforme.

Estado Trófico: estado do reservatório quanto à produtividade biológica e concentração de nutrientes.

Estratificação Térmica de reservatórios: estrutura em camadas sobrepostas, com diferentes temperaturas e, portanto, diferentes densidades

Eutrófico: lago ou reservatório com alta produtividade vegetal e alta concentração de nutrientes.

Evapotranspiração potencial (ETP): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Tucci, 1993 apud Penman, 1956).

Evapotranspiração real (ETR): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($ETR < ETP$)

Fitoplâncton: algas.

Floresta ripária ou aluvial: formações florestais presentes nos diques marginais dos rios.

Fonte Endógena: origem dentro do corpo d'água.

Fonte Exógena: origem externa ao corpo d'água.

Forçamento radiativo: é o aquecimento provocado pelo incremento de uma unidade do gás na concentração atmosférica.

Hipocentro: foco efetivo do sismo, a determinada profundidade da superfície.

Hipolímnio: camada inferior (fundo) de lagos e reservatórios, mais fria, com baixa turbulência e temperatura aproximadamente uniforme.

Isotermia: mesma temperatura.

Macrófitas aquáticas: vegetais superiores, que habitam desde brejos até ambientes verdadeiramente aquáticos, que se apresentam enraizados nos sedimentos e com folhas emersas, flutuantes ou totalmente submersas, ou livres (sem raízes), flutuantes ou submersas.

Material Alóctone: Restos de vegetação, organismos terrestres e sedimentos de fontes externas ao rio ou lago

Material Autóctone: idem, do próprio rio ou lago

Mesotrófico: lago com características intermediárias entre oligotrófico e eutrófico.

Metalímnio: camada intermediária, com grandes variações de temperatura.

Necton: peixes.

Nêustons: animais e plantas que vivem na superfície dos lagos, na região de interface com o ar.

OD: oxigênio dissolvido.

Oligotrófico: lago ou reservatório com baixa produtividade biológica e baixa concentração de nutrientes.

Perifíton: complexa comunidade microbiota (algas, bacterianas, fungos, animais, detritos orgânicos e inorgânicos) que está aderida a um substrato (macrófitas aquáticas, substrato rochoso ou pedras, superfície ou grãos do sedimento).

pH = potencial hidrogeniônico (indica o grau de acidez água).

Plâncton: comunidade biológica constituída por organismos vegetais (Fitoplâncton) e animais (Zooplâncton), que vivem em suspensão em águas doces, salobras ou salgadas.

Produção de bactérias: associada à degradação das substâncias orgânicas.

Produção Primária: é o aumento de biomassa em um dado intervalo de tempo, mais todas as perdas ocorridas neste período, ou seja, é a quantidade de matéria orgânica acrescida pela fotossíntese ou quimiossíntese em um dado intervalo de tempo. No caso da comunidade fitoplanctônica, as perdas principais são devidas à: respiração, excreção, secreção, morte, herbivoria e parasitismo.

Produtividade Primária: é a produção (P) expressa como taxa, ou seja, a produção em relação a um período de tempo (t). Corresponde à média ou à soma de várias medidas de taxas ou produção por período de dias ou ano. Exemplo: biomassa de fitoplâncton em um lago na data zero = 10g de peso seco/m². Após (t) 30 dias a biomassa resultou = 40g de peso seco/m². Portanto, a produção primária (P) foi de 30 g de peso seco/m² e a produtividade primária ($P/t=30 \text{ g/m}^2 \times 30 \text{ dias}$), foi de 1g de peso seco/m² x dia.

Tempo de Residência num lago ou reservatório: relação entre o volume do reservatório e a vazão afluente, em anos.

Termoclina: Plano imaginário que se situa no metalímnio, no ponto de máximo gradiente ($\delta^2 T / \delta Z^2 = 0$) do perfil vertical de temperatura.

UV: radiação ultravioleta invisível proveniente do sol

UVA: radiação ultravioleta de longo comprimento de onda, predominante no espectro da UV, de intensidade constante ao longo do ano

UVB: radiação ultravioleta de pequeno comprimento de onda, e mais intensos que os UVA, intensidade variável

UVC: radiações ultravioleta absorvida pela camada de ozônio e de efeito mais danoso

Zona Eufótica: zona do reservatório ou lago onde a luz solar penetra.

Zona Limnética: zona do reservatório ou lago onde a luz solar penetra.

Zona Pelágica: zona do reservatório ou lago onde a luz solar penetra.

Zooplâncton: animais invertebrados.

Aspectos Legais e Institucionais

ASPECTOS LEGAIS E INSTITUCIONAIS

Neste texto resumem-se as questões legais e institucionais relacionadas aos aspectos ambientais para a implantação de uma barragem em um rio, seja com a finalidade de geração de energia ou outra. São leis, normas e procedimentos que deverão ser consultados tanto para o projeto de novos empreendimentos, como para a implantação de medidas de controle ou atenuação dos impactos no meio ambiente de obras já implantadas.

- **Estudo de Impacto Ambiental**

A Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, institui o instrumento de avaliação de impacto ambiental com a finalidade de subsídio à decisão acerca de licenciamento de atividades potencialmente causadoras de impacto ambiental.

A Constituição de 1988 ratifica o Estudo de Impacto Ambiental como instrumento de política ambiental, determinando sua obrigatoriedade para a “instalação de obra ou atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio ambiente”.

As normas e procedimentos estabelecidos para o licenciamento ambiental de barragens são disciplinados pelas resoluções CONAMA 001 de 23/01/1986, 006 de 16/09/1987 e 237 de 19/12/1997.

- **Licenciamento Ambiental**

O Decreto 99.274/90 regulamenta a Lei Federal 6.938/81 (Lei da Política Nacional de Meio Ambiente), definindo que dependerão de prévio licenciamento do órgão estadual competente (e do IBAMA, em caráter supletivo), a construção, instalação, ampliação e funcionamento de empreendimentos capazes de causar degradação ambiental (Artigo 17).

A Resolução CONAMA 237/97 define as licenças ambientais a serem outorgadas em cada fase do empreendimento - Licença Prévia - LP; Licença de Instalação - LI e Licença de Operação - LO. No seu Artigo 12º também estabelece que os empreendimentos deverão ser licenciados em um único nível de competência.

A referida resolução 237/97 determina ainda uma maior influência dos municípios no processo de licenciamento, exigindo a apresentação de uma certidão da Prefeitura Municipal, declarando que o local e o tipo de empreendimento estão em conformidade com a legislação aplicável ao uso e ocupação do solo. Também define que, quando for o caso, deverá ser encaminhada ao órgão ambiental autorização para a supressão de vegetação.

As audiências públicas tem por finalidade apresentar o conteúdo dos estudos ambientais e do seu respectivo RIMA para a comunidade, dirimindo dúvidas e recolhendo dos presentes suas críticas e sugestões, sendo regulamentadas pela Resolução CONAMA 009/87.

O Art.8º da Medida Provisória nº 2.147/01 definiu o prazo máximo de seis meses para os órgãos licenciadores analisarem os EIAs/RIMAs de usinas hidrelétricas.

- **Sanções Penais**

A Lei 9.605/98, denominada Lei dos Crimes Ambientais, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Esta Lei foi regulamentada pelo Decreto 3.179/99.

- **Recursos Hídricos**

De acordo com a Constituição Federal de 1988, os recursos hídricos pertencem à União ou aos Estados, não havendo domínio municipal.

O regime jurídico das águas no Brasil é estabelecido pelo Decreto 24.643/34, denominado Código de Águas, e sua classificação em função dos usos permitidos é feita pela Resolução CONAMA 20/86.

A Lei 9.433/97 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, estabelecendo como objetivos da política, entre outros, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, com vistas ao desenvolvimento sustentável; e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais (Artigo 2º).

A Política Nacional de Recursos Hídricos considera a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, princípio que se aplica para as águas continentais, tanto superficiais como subterrâneas.

À Agência Nacional de Águas – ANA, entidade federal cabe autorizar o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União (Lei 9.984 de 17/07/2000).

O artigo 7º dessa Lei estabelece que, para o uso do potencial de energia hidráulica, a ANEEL fará a reserva de disponibilidade hídrica, junto à ANA. Essa reserva será transformada em direito de uso de recursos hídricos a favor da instituição ou empresa que receber da ANEEL a concessão ou autorização de uso do potencial de energia hidráulica.

- **Unidades de Conservação**

Segundo a Resolução CONAMA 02/96, o licenciamento de empreendimentos de relevante impacto ambiental (definidos em função da análise dos estudos ambientais por parte do órgão ambiental), terá como um dos requisitos a serem atendidos pelo empreendedor, a implantação de uma Unidade de Conservação de Domínio Público e Uso Indireto, preferencialmente uma estação ecológica.

Nesses casos, o montante dos recursos a serem empregados na área será proporcional ao dano ambiental a ressarcir e não poderá ser inferior a 0,5 % (meio por cento) dos custos totais previstos para a implantação do empreendimento, devendo o EIA e o RIMA apresentar proposta, projeto ou indicar possíveis alternativas para tanto.

- **Flora Terrestre**

O tratamento da vegetação natural e das áreas de preservação nas margens de rios e reservatórios são regulamentados pelo Código Florestal (Lei 4771/65). A Medida Provisória 2166-67 de agosto de 2001 estabelece que, na implantação de reservatórios artificiais, é obrigatória a aquisição, pelo Empreendedor, de área de preservação permanente no entorno dos mesmos.

A Resolução CONAMA 302 de 20/03/2002 define os parâmetros e limites das áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. A Área de Preservação deve ter como largura mínima, em projeção horizontal medida a partir do nível máximo normal, trinta metros em áreas urbanas consolidadas e cem metros em áreas rurais. Esta resolução também define que o Empreendedor deve elaborar um Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório.

- **Fauna Silvestre**

A Lei 5.197/67 estabelece normas de proteção à fauna silvestre. São considerados silvestres os animais de qualquer espécie, em qualquer fase do seu desenvolvimento, que vivem naturalmente fora de cativeiro. A competência para legislar sobre fauna é concorrente entre a União, Estados e o Distrito Federal.

A Lei autoriza ainda o Poder Público (Federal, Estadual e Municipal) a criar Reservas Biológicas, onde as atividades de utilização, perseguição, caça, apanha, ou introdução de espécimes da fauna e flora silvestres e domésticas, bem como modificações do meio ambiente a qualquer título, são proibidas, ressalvadas as atividades científicas devidamente autorizadas pela autoridade competente.

- **Patrimônio Cultural**

Em seu Artigo 216, a Constituição Federal define o patrimônio cultural brasileiro como “os bens de natureza material e imaterial, tomados individualmente ou em conjunto, portadores de referência à identidade, à ação e à memória dos

diferentes grupos formadores da sociedade brasileira, nos quais se incluem (...) os conjuntos urbanos e sítios de valor histórico, paisagístico, artístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico”.

A competência para proteger documentos, obras e outros bens de valor histórico, artístico e cultural, os monumentos, as paisagens naturais notáveis e os sítios arqueológicos é compartilhada pela União, Estados, Distrito Federal e Municípios.

- **Desapropriação**

A desapropriação, além da negociação direta, é o principal instrumento legal para a aquisição das áreas necessárias à implantação de usina hidrelétrica sob regime de concessão. O presente caso é regulamentado pelo artigo 10º da Lei 9.074 de 07/07/1994, que dispõe:

“Cabe ao poder concedente declarar a utilidade pública para fins de desapropriação ou instituição de servidão administrativa, das áreas necessárias à implantação de instalações concedidas, destinadas a serviços públicos de energia elétrica, autoprodutor e produtor independente.”

- **Compensação Financeira**

A implantação de uma usina hidrelétrica implica a utilização de recursos hídricos para geração de energia. Neste sentido, foram previstos mecanismos de compensação financeira à União, aos Estados e municípios cujas terras tenham sido utilizadas para instalações de geração ou inundadas pela implantação de reservatórios.

A lei de criação da ANA (Agência Nacional das Águas), define em 6,75% do valor da energia elétrica produzida a compensação financeira pela utilização de recursos hídricos para fins de geração.

A Lei 9993 de julho de 2000 define a distribuição dos recursos da seguinte forma:

- I. 45% - quarenta e cinco por cento aos Estados”;
- II. 45% - quarenta e cinco por cento aos Municípios”;
- III. 3,0% - três por cento ao Ministério do Meio Ambiente”;
- IV. 3,0% - três por cento ao Ministério de Minas e Energia”;
- V. 4,0% - quatro por cento ao Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT.

As resoluções da ANEEL nºs 66/01, 67/01 e 88/01 estabelecem as diretrizes, metodologias e a forma de cálculo do rateio da Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos para fins de geração de Energia Elétrica.

- **Regulamentação de Outros Recursos Naturais**

Os bens minerais estão sujeitos aos princípios da Constituição Federal e à regulamentação do Código de Mineração.