

**AVALIAÇÃO DE IMPACTOS HIDROGEOLÓGICOS COMO SUBSÍDIO À INSTALAÇÃO  
DE RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS NO ESTADO DE SÃO PAULO**

José Luiz Albuquerque Filho (\*)  
João Alberto Bottura (\*)  
Tarcísio Borin Júnior (\*\*)  
Wilson Aparecido Garcia Corrêa (\*\*)

**RESUMO**

Estudos hidrogeológicos desenvolvidos em áreas de influência de grandes reservatórios no Estado de São Paulo, São Paulo/Mato Grosso do Sul e São Paulo/Paraná, voltados para a avaliação em situação de pré-enchimento, possibilitaram a adoção de medidas preventivas, corretivas ou mitigadoras das possíveis alterações em aquíferos livres adjacentes e, por conseguinte, no uso e ocupação do meio físico, bem como o planejamento do uso racional de áreas não-ocupadas nas margens do reservatório. Apresentam-se a origem, o histórico e os objetivos dos estudos assim como impactos hidrogeológicos previstos e constatados em reservatórios monitorados.

---

(\*) Geólogos Pesquisadores da Seção de Águas Subterrâneas do Agrupamento de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente (Agama) da Divisão de Geologia (Digeo) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT, Caixa Postal 7141, CEP-01064-970, Cidade Universitária, Butantã, São Paulo, SP.

(\*\*) Geólogos da Diretoria de Meio Ambiente da Cesp-Companhia Energética de São Paulo; Alameda Ministro Rocha Azevedo, 25 - 3º andar, CEP-01410-900, Centro, São Paulo, SP.

## INTRODUÇÃO

Os estudos de avaliação dos impactos hidrogeológicos induzidos pelo enchimento de grandes reservatórios hidrelétricos se iniciaram de forma pioneira no Brasil no princípio da década de 1980, a partir da constatação de manifestações isoladas - porém frequentes - de problemas ambientais, associados particularmente aos usos e às ocupações das terras (encharcamentos de solo, desmoronamentos de paredes de poços, afogamento de estruturas enterradas, etc.), e decorrentes da elevação induzida sobre o lençol freático regional na área de influência de reservatórios antigos, instalados nos anos sessentas e setentas no Estado de São Paulo.

Diante destas constatações, a Cesp, preocupada com o problema e buscando entender de forma global os mecanismos envolvidos e a extensão real dos efeitos para, por um lado, corrigir os problemas surgidos e, por outro, conhecer, prevenir e corrigir de forma antecipada eventuais impactos negativos nos futuros reservatórios, solicitou ao IPT a concepção de estudos em nível de bacia de contribuição.

Assim, foi deflagrada uma série de estudos hidrogeológicos em reservatórios que objetivou caracterizar de forma global e em fase de pré-enchimento os possíveis efeitos da instalação de reservatórios de grandes barragens sobre sistemas aquíferos livres.

## O PROCESSO DE ELEVAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

A instalação de um reservatório em um vale que atua como área de descarga regional produz tanto reajuste transitório como mudanças permanentes, a longo prazo, no sistema hidrogeológico adjacente ao reservatório. Durante o enchimento do reservatório, um sistema de fluxo transitório é induzido nas suas áreas marginais. Como as cargas hidráulicas nas suas bordas sofrem elevação, ocorre inversão das direções de fluxo e, temporariamente, se estabelece um fluxo do reservatório para o sistema aquífero. Em reservatórios com dezenas ou centenas de quilômetros de comprimento e cota de nível d'água de dezenas de metros superior ao nível original, o significado quantitativo deste sistema de fluxo transitório pode ser considerável.

O resultado final do reajuste transitório inicial é uma alteração a longo prazo e permanente do regime hidrogeológico regional. Os níveis d'água são elevados; o nível de base regional eleva-se, as cargas hidráulicas do aquífero são aumentadas; porém os gradientes hidráulicos são suavizados, diminuindo a descarga de base do aquífero para os exutórios naturais (FIGURA 1).

Se os níveis d'água, anteriores à formação do reservatório, são profundos, a elevação regional pode ser benéfica, possibilitando a captação mais favorável dos recursos hídricos subterrâneos e mesmo melhorando as condições de umidade dos solos superficiais e, conseqüentemente, suas condições de cultivo. Por outro lado, se os níveis d'água estão próximos da superfície, esta influência poderá ser prejudicial, pois os

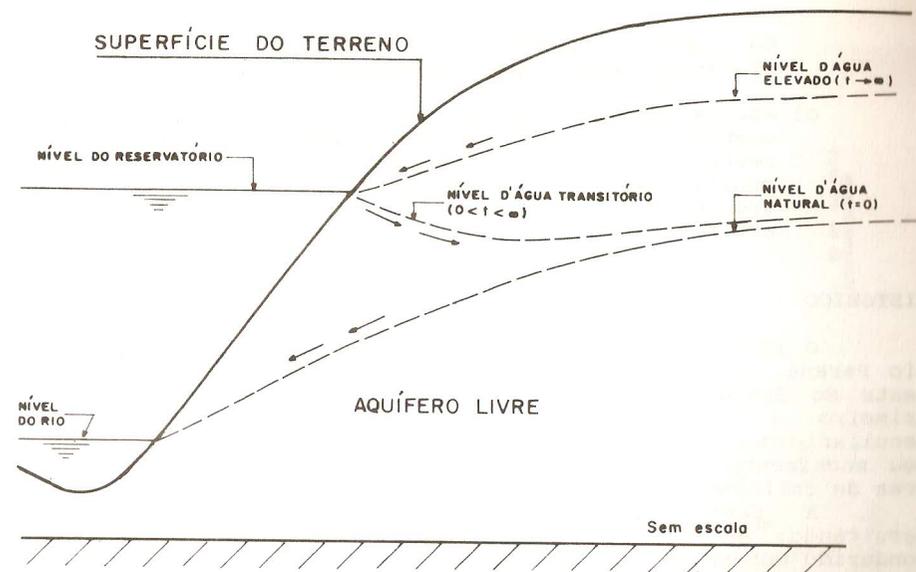


FIGURA 1 - Evolução das elevações induzidas no lençol freático

solos superficiais podem sofrer saturação, ocasionando o afogamento de raízes e possibilitando a salinização, diminuindo, assim, a capacidade de produção agrícola da área ou, ainda, a formação de nascentes e lagoas em zonas topograficamente mais deprimidas.

## OBJETIVOS

Os estudos de avaliação de impactos hidrogeológicos de reservatórios têm como objetivo amplo dotar os meios responsáveis pelo planejamento, programação e controle da ocupação territorial e urbana nos entornos dos reservatórios de elementos e informações úteis para o desenvolvimento acrítico das atividades a estes pertinentes.

Quanto aos objetivos específicos, são buscados, em geral e de acordo com a fase e escala do estudo:

- escala regional (primeira fase) - nesta fase os estudos são desenvolvidos para identificar as zonas de influência ao longo de todo o reservatório, registrar usos e ocupações de destaque do solo nelas estabelecidos, assim como identificar os elementos necessários para o detalhamento dos estudos em fases subseqüentes;
- escala em semidetalhe ou detalhe (segunda fase) - compreende um detalhamento de áreas prioritizadas na primeira fase, assim como o estabelecimento de uma rede de observação para o monitoramento do enchimento do reservatório em tais áreas, onde são considerados os possíveis efeitos hidrogeológicos e as respostas



ANO	OBJETIVOS	OBSERVAÇÕES
1982	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir zonas de influência</li> <li>Registrar usos e ocupações relevantes</li> <li>Avaliar efeitos da elevação do lençol freático sobre usos e ocupações do solo</li> <li>Definir elementos para os estudos de detalhamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo efetuado em escala regional (1:500.000 e 1:250.000)</li> <li>Foram definidas três zonas de influência</li> <li>Utilizados valores médios para a amplitude de elevação do nível de descarga do aquífero livre</li> <li>Destacadas Anaurilândia e Bataguassu (MS) e Panorama, Presidente Epitácio e Campinal (SP)</li> </ul>
1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar áreas críticas</li> <li>Caracterizar composição química das águas subterrâneas pré-enchimento</li> <li>simular elevação do lençol freático através de modelo matemático</li> <li>estabelecer malha de monitoramento piezométrico e hidroquímico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Área da Lagoa São Paulo e Campinal destacados no estudo anterior</li> <li>Estudo efetuado em escala de detalhe e semi-detalhe (escalas 1:100.000, 1:50.000 e 1:25.000)</li> <li>Pioneiro no uso de modelo matemático na avaliação de impacto hidrogeológico de reservatórios</li> <li>Modelo utilizado: PINDER (1971)</li> <li>Modelo não inclui componente Evapotranspiração</li> </ul>
1988	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atualizar caracterizações químicas efetuadas em 1985</li> <li>simular elevação do lençol freático utilizando modelo matemático mais completo que anterior, usado em 1985</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo efetuado nas mesmas escalas do anterior realizado em 1985</li> <li>Modelo utilizado: TRESMOTT et al. (1976)</li> <li>Simulação inclui componente evapotranspiração</li> <li>Questões pendentes: simulações e aferições periódicas</li> </ul>
1991 até Hoje	<p>Ao Nível Regional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Atualizar conhecimento do uso e ocupação de destaque do solo</li> <li>Detalhar zonas de influência máxima e intermediária do IPT (1982)</li> <li>Planejar monitoramento piezométrico do reservatório</li> </ul> <p>Ao Nível de Detalhe:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Efetuar avaliações detalhadas em locais destacados em estudos anteriores quanto</li> <li>Avaliar elevações induzidas sobre o lençol freático e interferências sobre usos e ocupações estabelecidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reavaliado potencial de influência do reservatório</li> <li>Zonas de influência definidas a partir de amplitudes de elevação do nível de descarga de base calculados ponto-a-ponto</li> <li>Destacados 33 locais quanto ao uso e ocupação do solo compreendendo cidades, assentamentos, indústrias, etc.</li> <li>Vila Nova Porto XV de Novembro (MS): Análise de Potencial de Influência sobre Reassentamento ao uso e ocupação do solo</li> <li>Bataguassu (MS), Presidente Epitácio (SP), Posto Fiscal na BR-267 (MS): Análise de efeito da elevação do lençol freático sobre instalações</li> <li>Projeto Lagoa São Paulo e Campinal (SP): uso do modelo ModFlow do USGS (McDONALD &amp; HARBAUGH 1988) para simular elevações induzidas no lençol freático e subsidiar análises hidrogeológicas, agronômicas e geotécnicas (estudo iniciando).</li> </ul>

QUADRO 1 - Estudos desenvolvidos no reservatório de Porto Primavera (SP-MS)

ANO	OBJETIVOS	OBSERVAÇÕES
1983	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir zonas de influência</li> <li>Registrar usos e ocupações relevantes</li> <li>Avaliar efeitos da elevação do lençol freático sobre usos e ocupações do solo</li> <li>Avaliar efeitos da construção do Canal de Pereira Barreto (interligação com reservatório de Ilha Solteira) sobre aquífero livre</li> <li>Definir elementos para os estudos de detalhamento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo regional (1:200.000) e semidetalhe (1:100.000 e 1:50.000)</li> <li>Foram definidas três zonas de influência</li> <li>Utilizados valores médios para a amplitude de elevação do nível de descarga do aquífero livre</li> <li>Destacadas as cidades de Pereira Barreto e Sud Mennucci (SP) e distritos de Bela Floresta e Santo Antonio de Aracanguá (SP)</li> <li>Avaliada ação do canal e interação canal/reservatório</li> </ul>
1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levantar acervo de dados</li> <li>Cadastro global de poços</li> <li>Planejar etapa subsequente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo de detalhe (1:10.000)</li> <li>A cidade de Pereira Barreto (SP) foi priorizada pelas peculiaridades (solo, elevação freática, etc.)</li> <li>Efetuada avaliação hidrogeológica preliminar</li> </ul>
1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avaliar detalhadamente os efeitos da construção do canal de Pereira Barreto (SP) sobre o aquífero livre</li> <li>Avaliar detalhadamente os efeitos do enchimento do reservatório sobre o lençol freático na área da cidade</li> <li>Analisar ação interativa canal/reservatório</li> <li>Planejar monitoramentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo de detalhe (1:10.000)</li> <li>Segunda etapa do estudo na cidade de Pereira Barreto (SP)</li> <li>Efetuada exaustiva campanha de investigações hidrogeológicas</li> <li>Definidas três zonas de influência</li> <li>Avaliados efeitos do canal e interação canal/reservatório</li> <li>Resultados do estudo subsidiou pesquisas específicas de colapsividade de solo, recalque sob fundações e efeitos em estruturas de edificações</li> </ul>
1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atualizar conhecimento do uso e ocupação de destaque do solo</li> <li>Detalhar zonas intermediária e máxima influência</li> <li>Avaliar efeitos da elevação do lençol freático sobre usos e ocupações de destaque do solo</li> <li>Planejar monitoramentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo regional em escala de detalhe (1:50.000)</li> <li>Reavaliado potencial de influência do reservatório</li> <li>Zonas de influência definidas utilizando-se amplitudes de elevação do nível de descarga de base do aquífero ponto-a-ponto</li> <li>Destacados 17 locais quanto ao uso e ocupação do solo compreendendo cidades, assentamentos, indústrias, etc.</li> </ul>
1992 até Hoje	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quantificar elevações do lençol freático através da utilização de modelo matemático</li> <li>Subsidiar análises geotécnicas</li> <li>Monitorar efeitos do enchimento até estabilização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escala de detalhe (1:10.000)</li> <li>Utilização do modelo ModFlow do USGS (McDONALD &amp; HARBAUGH, 1988)</li> <li>Reavaliados resultados de IPT (1989)</li> <li>Efetuada 60 campanhas de monitoramento piezométrico</li> </ul>

QUADRO 2 - Estudos desenvolvidos no reservatório de Três Irmãos (SP).

ANO	OBJETIVOS	OBSERVAÇÕES
1983	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avaliar efeitos do enchimento do reservatório manifestados através do afloramento ou sub-afloramento do lençol freático</li> <li>Indicar orientações para mitigação do processo</li> <li>Orientar sobre monitoramento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escala de detalhe</li> <li>Foram visitados vários locais com problema de elevação do lençol freático: lagoas às margens da Rodovia SP-425, distrito de Zacarias (SP) e várias Fazendas da região do reservatório</li> </ul>
1984	<p>A nível de detalhe: visitar área-problema com os mesmos objetivos daquelas visitas do ano de 1983</p> <p>A Nível Regional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Avaliar efeitos do enchimento do reservatório já manifestados em vários pontos da bacia através da elevação do lençol freático</li> <li>Delimitar zona crítica nos entornos do reservatório a partir das manifestações pontuais</li> <li>Planejar monitoramentos</li> </ul> <p>A Nível Regional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Acompanhar as observações e previsões efetuadas no estudo anterior</li> </ul>	<p>A nível de detalhe: foi visitada mais uma Fazenda na região do Reservatório</p> <p>A Nível Regional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo efetuado em escala 1:100.000</li> <li>Primeiro reservatório a ser estudado após o enchimento (01 ano) dentro do programa desenvolvido pela Cesp e IPT</li> <li>Foi delimitada zona crítica a partir de medições de nível d'água e outras observações de campo, aliadas à depoimentos de moradores da bacia</li> <li>Foram identificados nove áreas-problema na bacia do reservatório, compreendendo aglomerações, fazendas, rodovias, etc.</li> </ul> <p>A Nível Regional:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Escala idêntica à do estudo anterior</li> <li>Foram efetuadas novas observações de campo com aproximadamente um ano após o estudo anterior</li> <li>Foi efetuada reavaliação da zona crítica definida no trabalho anterior</li> </ul>

QUADRO 3 - Estudos desenvolvidos no reservatório de Nova Avanhandava (SP).

ANO	OBJETIVOS	OBSERVAÇÕES
1986	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir zonas de influência</li> <li>Registrar usos e ocupações relevantes</li> <li>Avaliar efeitos da elevação do lençol freático sobre usos e ocupações do solo</li> <li>Definir elementos para os estudos de detalhamento</li> <li>Planejar monitoramentos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo efetuado em escala regional (1:200.000) e semidetalhe (1:100.000)</li> <li>Os dois reservatórios foram estudados simultaneamente face a proximidade geográfica, na época de construção e meio físico semelhante</li> <li>Foram definidas três zonas de influência</li> <li>Utilizados valores médios para a amplitude de elevação do nível de descarga do aquífero livre na definição de zonas de influência</li> <li>O reservatório de Rosana foi setorizado em três compartimentos e o de Taquaruçu, em dois, de acordo com características hidrogeológicas e de efeitos do enchimento sobre o lençol freático</li> <li>Compartimentos das porções jusante dos reservatórios sofreriam máximos efeitos do enchimento</li> <li>Foi destacada uma área de uso e ocupação do solo na área de influência do reservatório de Rosana, enquanto que no de Taquaruçu não foi constatada nenhuma.</li> </ul>
1987	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atualizar medidas do nível d'água subterrânea</li> <li>Ampliar mapa de potencial de influência do reservatório de Rosana para monitoramento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efetuada uma campanha de medição da profundidade do lençol freático</li> <li>Elaboração de mapas de potencial de influência na escala 1:50.000 a partir dos mapas 1:100.000 do estudo anterior</li> </ul>
1989	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definir plano e área de monitoramento do reservatório de Taquaruçu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definido o subtrecho de jusante (C1) como área prioritária de monitoramento</li> </ul>
1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservatório de Rosana: <ul style="list-style-type: none"> <li>Efetuar análise comparativa entre previsões e valores medidos para o lençol freático após o enchimento do reservatório</li> <li>Orientar continuidade do monitoramento piezométrico</li> </ul> </li> <li>Reservatório de Taquaruçu: <ul style="list-style-type: none"> <li>Atualizar conhecimento do uso e ocupação de destaque do solo</li> <li>Detalhar as zonas intermediária e máxima influência do enchimento</li> <li>Avaliar efeitos da elevação do lençol freático sobre usos e ocupações de destaque do solo</li> <li>Planejar monitoramentos</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reservatório de Rosana <ul style="list-style-type: none"> <li>Interpretações foram prejudicadas face a não sistematização na coleta de informações no período considerado (1985/1990)</li> </ul> </li> <li>Reservatório de Taquaruçu <ul style="list-style-type: none"> <li>Estudo regional em escala de detalhe (1:50.000)</li> <li>Reavaliado o potencial de influência do reservatório no subtrecho de jusante (C1), considerado trecho mais suscetível aos efeitos do enchimento</li> <li>As zonas de influência foram definidas utilizando-se amplitudes de elevação do nível de descarga de base calculadas ponto-a-ponto</li> <li>Não foram destacados locais quanto ao uso e ocupação do solo</li> </ul> </li> </ul>

QUADRO 4 - Estudos desenvolvidos nos reservatórios de Rosana e Taquaruçu (SP e PR).

vales e de depressões topográficas e aumento da umidade subsuperficial de solos topograficamente elevados, com a conseqüente formação de vegetação permanentemente verde;

- b) área de influência de Ilha Solteira - decorridos cerca de 10 anos após o enchimento do reservatório (1973 a 1983), relataram-se manifestações de elevação do nível freático até 10 km, constatadas através da subida de até 3 m no nível d'água de poços no Estado de São Paulo e de até 7 m, no Estado do Mato Grosso do Sul, afogamento de fossas negras, surgimento de nascentes e formação de alagados permanentes em zonas topograficamente deprimidas, e, segundo os depoimentos coletados, tais manifestações teriam ocorrido em períodos variados de tempo após o enchimento do reservatório;
- c) área de influência de Nova Avanhandava - decorridos apenas seis meses após o enchimento do reservatório (set.82/fev.83), os efeitos de seu enchimento já eram manifestos até 5 km de distância, sendo constatados através de relatos que apontaram elevação de até 10 m do nível d'água de cacimbas e de lagoas intermitentes e surgimento de nascentes em fazendas da região; e
- d) área de influência de Três Irmãos - decorridos 2,5 anos após o enchimento do reservatório (agosto 90/novembro 92), são observadas elevações da ordem de 20,0 m na periferia da cidade de Pereira Barreto, SP, e borda do lago. Ressalte-se que esta amplitude de valor para a elevação do lençol freático é minimizada pelo fato de que os níveis d'água originais na área eram profundos; de mais a mais todo o processo foi passa a passo monitorado hidrogeológica e geotecnicamente na cidade, e as possíveis implicações, devidamente sanadas.

## CONCLUSÕES

Levando-se em consideração o exposto anteriormente, pode-se concluir que os estudos previsionais de impactos hidrogeológicos de enchimento de grandes reservatórios, executados antecedentemente à implantação dessas obras, revestem-se de suma importância, no sentido do prévio conhecimento dos possíveis efeitos a serem induzidos; o que possibilita tanto eventuais prevenções, correções ou mitigações desses efeitos em áreas já ocupadas, como propiciam uma ferramenta importante para planejamento do uso de áreas ainda não-ocupadas e, ainda, o acompanhamento *pari passu* de todo o processo de enchimento e suas manifestações, no aquífero adjacente.

A realização dos estudos mencionados tem permitido o conhecimento global dos mecanismos envolvidos nos impactos hidrogeológicos, como também a extensão real dos efeitos advindos do enchimento dos reservatórios, possibilitando à Cesp a adoção de

medidas preventivas, corretivas ou mitigadoras de acordo com a vinculação entre a situação manifestada e o enchimento do reservatório - o que tem ocorrido com freqüência na área da cidade de Pereira Barreto - e, ainda, o planejamento de destinação de áreas não-ocupadas nas bordas de reservatórios - o que tem ocorrido com reassentamentos de populações de áreas de inundação.

Cita-se como exemplo o caso da cidade de Pereira Barreto, SP, situada na borda do reservatório de Três Irmãos, onde a previsão e constatação da elevação do lençol freático induzida pelo enchimento, levou a Cesp a adotar, dentre outras, as seguintes medidas: reforma e reconstrução de cerca de três centenas de moradias, remoção de antigo lixão da cidade, implantação de nova e completa rede de esgoto e construção de lagoas de tratamento dos efluentes domésticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MCDONALD, M.G. & HARBAUGH, A.W. 1988. A modular Three - Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. U.S.G.S. 528 p. (Geological Survey Open File Report 83 875).
- PINDER, G.F. 1971. An Interative Digital Model for Aquifer Evaluation. Washington, U.S. Geological Survey.
- TRESCOTT, P.C.; PINDER, G.F.; LARSON, S.P. 1976. Finite difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiments. Washington, U.S. Geological Survey. (Book 7, Chapter 01).