

MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E DA SUSCEPTIBILIDADE DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS INSTABILIZATÓRIOS EM DECORRÊNCIA DA FORMAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

*HYDROGEOLOGIC MONITORING AND ASSESSMENT OF INSTABILIZATORY PROCESSES
DUE TO THE FORMATION OF HYDROPOWER RESERVOIRS*

MARCIO DA ROSA MAGALHÃES BESSA

*Centrais Elétricas do Norte do Brasil - Eletrobras Eletronorte e Programa de
Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília. m_bessa@hotmail.com*

JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. eloi@unb.br

RESUMO ABSTRACT

Quando o nível freático de aquíferos rasos se eleva em função da formação do reservatório de uma usina hidrelétrica, podem ocorrer processos instabilizatórios relacionados a solos colapsáveis. Esse fato tem impactado áreas urbanas e rurais adjacentes a corpos d'água artificiais, em diferentes regiões do Brasil, como, por exemplo, Pereira Barreto, SP, Terra Roxa, PR e Porto Nacional, TO. A patologia geotécnica em razão da colapsividade dos solos e elevação artificial dos níveis freáticos é um caso em que ferramentas estratégicas e metodologias específicas podem auxiliar com dados, informações e análises nas etapas de projeto e implantação de usinas hidrelétricas, bem como nos relatórios de impactos ambientais. Este trabalho propõe um sistema cíclico para monitoramento e avaliação de empreendimentos de geração hidrelétrica que requerem a formação de reservatórios artificiais. Dentre os elementos considerados destacam-se: a definição de informações necessárias, a coleta adequada de dados, a análise dos dados e a utilização apropriada da informação. Mais especificamente para o monitoramento de processos instabilizatórios e aspectos hidrogeológicos em áreas marginais de reservatórios de hidrelétricas algumas variáveis são fundamentais, incluindo: a declividade na orla do reservatório, os tipos de ma-

When the groundwater level of shallow aquifers increases by the formation of a hydroelectric plant reservoir, it may occur instabilizatory processes related to collapsible soils. This fact has impacted urban and rural areas adjacent to artificial water bodies, in different regions of Brazil, such as Pereira Barreto, São Paulo State, Terra Roxa, Paraná State and Porto Nacional, Tocantins State. Geotechnical pathology due to soil collapse and artificial elevation of groundwater levels is a case in which specific strategic tools and methodologies can assist with data, information and analysis the stages of design and implementation of hydroelectric plants, as well as in the environmental impact reports. This work proposes a cyclical system for monitoring and evaluating hydroelectric generation projects that require the formation of artificial reservoirs. Among the elements considered there are: the definition of necessary information, adequate data collection, data analysis and appropriate use of information. More specifically for the monitoring of instabilizatory processes and hydrogeological aspects in marginal areas of hydroelectric reservoirs some variables are fundamental, including: the slope on the edge of the reservoir, the types of materials that make up the aquifer and the rate of elevation of the

teriais que compõem o aquífero e a taxa de elevação do nível freático. O sistema cíclico de monitoramento e avaliação concebido pode ser aplicado com retorno em diferentes fases, desde que os técnicos envolvidos considerem a necessidade da obtenção de novos dados, ou retorno às análises dos dados com mudança de estratégias ou métodos. O objetivo final do sistema de monitoramento proposto é a gestão territorial e dos recursos hídricos subterrâneos, visando à mitigação de impactos e o ordenamento da ocupação das áreas marginais aos reservatórios.

Palavras-chave: Usina hidrelétrica, monitoramento, hidrogeologia, engenharia geotécnica.

1 INTRODUÇÃO

A susceptibilidade ao desenvolvimento de processos instabilizatórios relacionados aos solos é potencializada quando os sistemas são afetados pela elevação artificial do nível freático devido à formação de reservatórios de Usinas Hidrelétricas.

Esse processo de ascensão do nível freático no solo se deve à percolação das águas do reservatório em direção ao aquífero e é uma das mais importantes modificações que impactam as regiões adjacentes ao corpo d'água seja pela formação de novos aquíferos ou pela elevação do lençol freático existente (Albuquerque *et al.*, 2004; Rodrigues & Vilar, 2013; Campos *et al.*, 2019).

Como consequência da elevação da umidade, solos com estrutura metaestável e com baixo peso específico podem ser submetidos a processos instabilizatórios. Estes processos são decorrentes do aumento de volume por saturação e posterior redução por secagem nas porções do perfil que anteriormente não estavam em condição de saturação permanente (Vilar & Ferreira 2015). Desta forma há possibilidade de ocorrência de patologias geotécnicas nas fundações das edificações previamente existentes nas áreas submetidas à elevação do nível freático, que após a formação dos reservatórios tenderá a permanecer em nível mais alto. As interferências nas fundações causadas pela elevação dos níveis podem culminar no desenvolvimento de patologias na superestrutura.

Edificações da cidade de Pereira Barreto, SP, por exemplo, apresentaram patologias geotécnicas em razão da colapsividade dos solos que foi

groundwater level. The cyclic system of monitoring and evaluation designed can be applied with return in different phases, since the technicians involved consider the need to obtain new data, or return to data analysis with changing strategies or methods. The ultimate objective of the proposed monitoring system is the management of territorial and groundwater resources, aiming at mitigating impacts and planning the occupation of marginal areas to reservoirs.

Keywords: Hydroelectric Power Plant, monitoring, hydrogeology, geotechnical engineering.

ampliada em função da elevação do lençol freático causado pelas águas do reservatório da Usina Hidrelétrica Três Irmãos (Vilar & Ferreira 2015). Por outro lado, a identificação da causa deste impacto é decisiva para os processos e iniciativas de mitigação, pois podem ser causas relacionadas ou não à elevação do nível freático. Neste sentido, pode-se citar o caso de patologias geotécnicas desenvolvidas nas áreas urbanas de Paranã, TO e São Salvador do Tocantins, TO em que as trincas e rachaduras não apresentavam relação de causa-efeito com a elevação do nível d'água vinculado ao Aproveitamento Hidrelétrico Peixe Angical (CDT/UnB 2008a).

A Figura 1 mostra exemplos de patologias geotécnicas associadas e não associadas à elevação do nível freático, sendo importante destacar que a geometria das estruturas é muito similar independentemente do seu fator desencadeante ou processo genético.

Campos *et al.* (2019) chamam atenção para os casos em que diferentes tipos de patologias são observados em edificações em cidades situadas no sul do estado do Tocantins antes do início da formação dos reservatórios naquela região. Os autores concluem que estes problemas são decorrentes das próprias características das edificações existentes no local, construídas sem a devida atenção na investigação do subsolo ou mesmo ausência de projeto e possibilidades de problemas na execução ou escolha de materiais. Interessante destacar que na região é comum a construção de pequenas residências com uso de adobe sobre um baldrame de pedra.

Em outros locais há clara relação de causa-efeito entre as patologias e a presença de solos colapsíveis. Com a elevação do nível freático há saturação dos solos que submetidos à carga axial

das edificações existentes colapsam, causando o recalque das fundações e o desenvolvimento de trincas e rachaduras na porção superior das edificações.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1. a) e b): Patologias geotécnicas em residências em áreas afetadas pela UHE Peixe Angical/TO não vinculadas à sobrelevação do NF (CDT/UnB, 2008a); c) e d): patologias em edificações em Pereira Barreto, SP causadas pela elevação do nível do lençol freático (Vilar & Rodrigues, 2011).

Outras características dos solos e propriedades da zona não saturada dos aquíferos freáticos que podem influenciar no desenvolvimento de patologias, incluindo a elevação por capilaridade (principalmente em solos de textura argilosa a muito argilosa), são a plasticidade (em solos ricos em argilominerais) e a estabilidade das estruturas (principalmente granular e grumosa).

Além das edificações (residências e prédios comerciais) estes problemas são também observados em sistemas de abastecimento de água, galerias de esgotos, redes de eletrificação e telefonia, pavimentos de ruas e pátios de estacionamentos (Leite, 2005).

Também pode haver impactos para a instalação futura de infraestruturas urbanas e rurais,

que podem ter seus custos ampliados em locais que sofreram sobrelevação dos níveis dos aquíferos freáticos.

Somado aos impactos de caráter geotécnico, ainda há a possibilidade de aumento do risco de contaminação das águas freáticas, como observado nos cemitérios de Babaçulândia/TO e de Carolina/MA, em que a mitigação do problema é complexa ou tecnicamente inviável.

É relevante, portanto, que as avaliações, diagnósticos e projeções dos impactos potenciais sejam incluídas nos estudos e projetos e nos relatórios de impactos ambientais nas diversas etapas de implantação de uma UHE.

Os impactos induzidos no lençol freático podem se manifestar por um longo tempo até atingir a estabilização causando interferências nos usos da água e do solo. Os conflitos potenciais entre diferentes grupos da sociedade demandam o uso de uma estratégia para garantir a proteção das águas na interface da geração hidroenergética e degradação do meio ambiente (Siqueira & Santos, 2021). Dentro desse contexto é importante que não haja restrições na integração e alinhamentos entre órgãos responsáveis pelo empreendimento barragem-reservatório dos setores hidroenergético e do meio ambiente. Portanto, é imperativo que se estabeleça uma estratégia metodológica, pois caso contrário todos os recursos envolvidos, incluindo, projetos, equipamentos, instalações, viagens de campo, dentre outros, não serão aplicados da forma mais adequada.

Este trabalho compreende a apresentação de uma proposta de estratégia metodológica de um Ciclo de Monitoramento e Avaliação em Hidrogeologia desde a construção da informação até a sua utilização final, de forma a se possibilitar a mitigação dos impactos da formação do reservatório artificial aos aquíferos e aos ambientes associados.

Desde já, destaca-se entre as inúmeras vantagens, que essa estratégia metodológica promove o fortalecimento da geração de dados e informações, e sua aplicação. Deve-se também enfatizar a possibilidade da tradução dos objetivos da gestão de recursos hidrogeológicos em variáveis técnicas, o que tem sido considerado como um aspecto frágil nas discussões sobre este tema (UN/ECE, 2006).

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O aumento da susceptibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios tratado neste trabalho resulta em patologias geotécnicas como: recalques, abaulamento de vigas e pisos, fissuras, rachaduras e trincas em edificações (Figuras 2 e 3) e são os principais problemas constatados em residências em áreas urbanas e rurais que passaram a ter influência da elevação artificial do nível freático. Esses problemas poderão ser um alerta para situações perigosas comprometendo a estabilidade, durabilidade e segurança das edificações e, naturalmente, com consequências na qualidade de vida das pessoas.

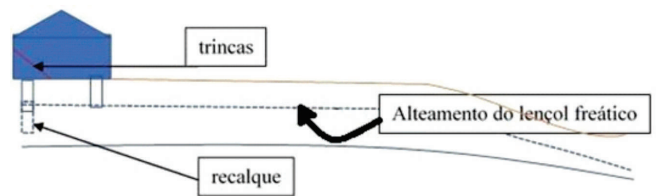


Figura 2. Ilustração esquemática da relação de causa-efeito vinculada à elevação do lençol freático. Neste caso a fundação que originalmente foi instalada na zona não saturada, passa a saturação permanente o que pode causar danos à estrutura da edificação.

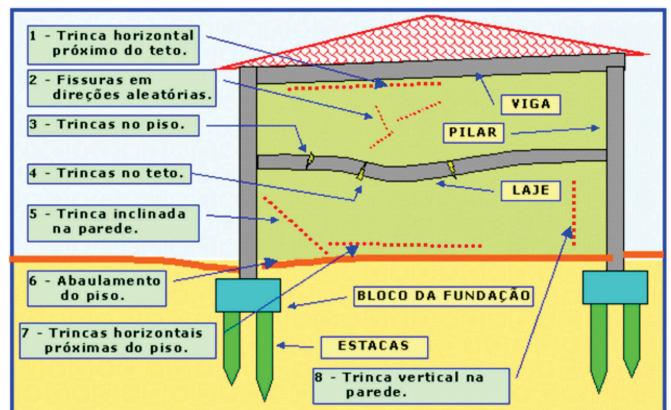


Figura 3. Exemplos de patologias geotécnicas que podem ser desenvolvidas em função da elevação artificial do nível freático de aquíferos rasos devido à formação de reservatórios artificiais.

Manzoli Júnior (1995, *apud* Albuquerque, 2002) realizou estudos no município de Pereira Barreto, SP, na margem do reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Irmãos. O autor apresentou um trabalho em que se identificou correlação entre o enchimento do reservatório, a elevação in-

duzida do lençol freático e o desenvolvimento de recalques em edificações situadas na área de risco delimitada pela Companhia Energética de São Paulo - CESP (Figura 4).

Devido à complexidade do novo ambiente subterrâneo estabelecido, algumas características

devem ser levantadas, compreendidas e acompanhadas. Um projeto de monitoramento e avaliação hidrogeológico surge como caminho para o enfrentamento desse problema para solucionar ou minimizar os possíveis e prováveis impactos negativos.

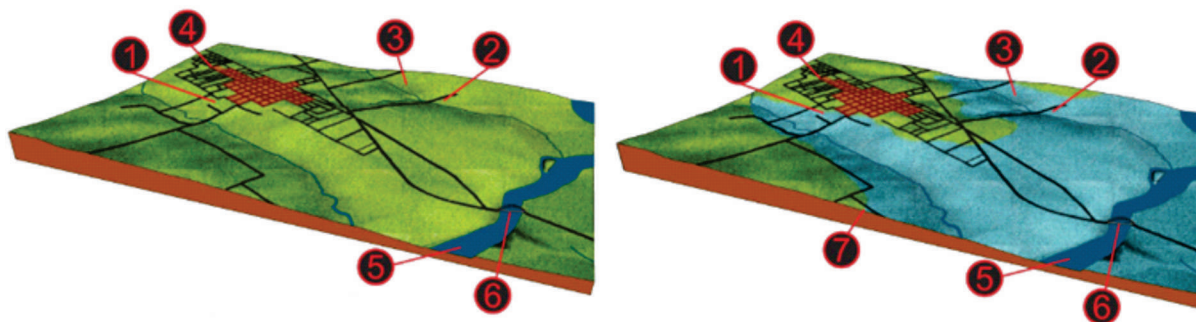


Figura 4. Cidade Pereira Barreto/SP antes e após represamento, 1 - cemitério; 2 - Matadouro municipal; 3 - Fazenda Dr. Aurázil de Campos; 4 - Cidade; 5 - Rio Tietê; 6 - Ponte Novo Oriente (atualmente submersa); e 7 - Nível atual do nível d'água (Bruno, 2019).

Para destacar a importância desse projeto em lidar com esses problemas, e proporcionar segurança na elaboração do diagnóstico, cita-se o estudo de Albuquerque (2002) para o caso do município de Terra Roxa, PR. Neste caso os problemas geotécnicos observados em edificações e em equipamentos urbanos foram anteriormente definidos como causados por atividade sísmica induzida, em consequência do enchimento do reservatório de Itaipu. Entretanto, a resposta, com bases nas observações e medições de campo, mostrou que os problemas eram de fato devidos à excessiva umidificação a partir da infiltração das águas a partir do reservatório e das chuvas (Albuquerque, 2002).

Na realidade a umidificação do solo proporciona adensamento volumétrico reduzindo a capacidade de suporte de carga e variação na estabilidade geotécnica, acarretando problemas nas estruturas das edificações urbanas (Albuquerque, 2010).

A análise do aumento da susceptibilidade instabilizatória se baseia principalmente nos es-

tudos das estruturas afetadas pela nova configuração do nível freático que por sua vez leva em consideração: a interação entre os materiais que compõem o aquífero; as elevações originais do nível freático; a elevação da lâmina d'água do rio e a declividade do terreno na orla do reservatório (CDT/UnB, 2008a).

A Figura 5 mostra a formação de uma zona do lençol freático adjacente ao futuro reservatório desde o momento que antecede ao enchimento, **a**) - $t = 0$, ainda na fase rio, com detalhe mostrando a descarga do lençol em direção ao rio; **b**) - $(0 < t < \infty)$, período de inversão do fluxo subterrâneo, a partir da margem do reservatório em direção à zona saturada do aquífero, com o surgimento de uma zona de depressão (*hollow*) no encontro entre os dois sistemas até o completo enchimento do reservatório; e **c**) - $(t \sim \infty)$, quando um novo equilíbrio é estabelecido onde a descarga do aquífero volta a ser em direção ao reservatório a partir de águas de recarga que abastecem a zona saturada do aquífero, com carga hidráulica maior que no cenário original.

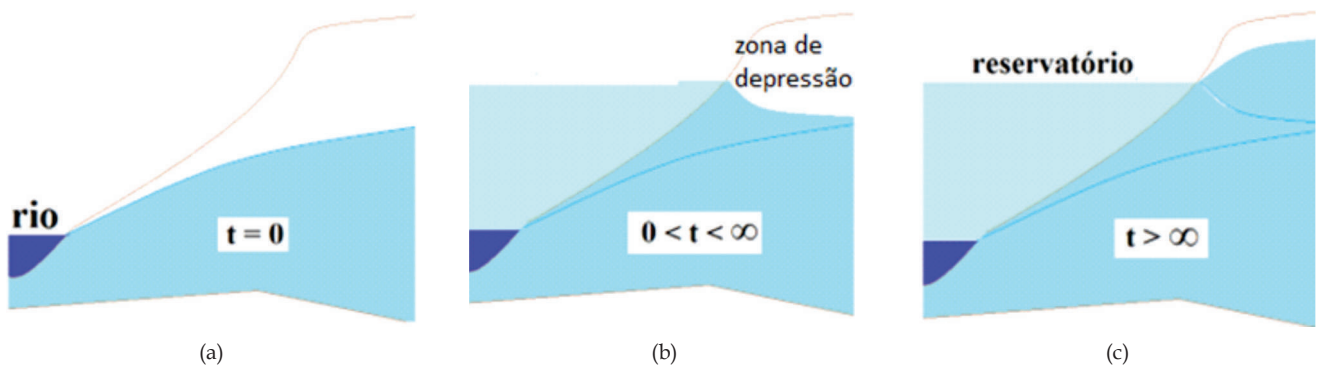


Figura 5. Fases da elevação do lençol freático devido à formação de um reservatório artificial. a) fase original do rio (apenas com variações sazonais de nível d'água); b) fase de enchimento do reservatório; e c) fase de operação do reservatório, após longo período de tempo depois da formação do reservatório.

Quando esta questão é analisada desde a fase inicial de planejamento do sistema usina-reservatório, sendo incluída na etapa de coleta e análise de dados geológicos e geotécnicos, impactos que a ascensão do nível d'água poderiam causar serão conhecidos com antecedência e ações concretas poderão ser desenvolvidas no sentido de mitigá-los.

Entende-se por inventário os estudos diversos (relatórios, artigos técnicos, dissertações teses etc.) que contemplam, parcial ou integralmente, a bacia hidrográfica, destacando-se os relativos aos seguintes temas e áreas do conhecimento: recursos minerais, sismicidade, fauna, cobertura vegetal, geologia, geotecnia, geomorfologia, pedologia, hidroclimatologia, hidrometeorologia, limnologia e ictiologia (CEPEL, 2007). Alguns estados brasileiros exigem de forma prévia ao inventário o Estudo Integrado de Bacia Hidrográfica - EIBH, de modo que seja possível avaliar a cumulatividade e sinergia entre diferentes impactos.

Dessa maneira as áreas com susceptibilidade de desenvolvimento de processos instabilizatórios e patologias geotécnicas devem ser caracterizadas e identificadas desde o início do desenvolvimento dos estudos. Os dados preliminares deverão ser integrados com as diversas ações mitigadoras colaborando para aperfeiçoar os recursos disponíveis com maior probabilidade de atingir a pre-

venção ou mitigação do impacto, objeto da gestão inicial. Essas ações integradas devem contribuir, portanto, com a minimização de prejuízos econômicos e ações jurídicas, pagamentos de indenizações, além das inúmeras consequências negativas para a comunidade afetada.

3 CONSTITUIÇÃO DA INFORMAÇÃO: MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO

Uma estratégia metodológica é fundamental para orientar todas as atividades de um projeto de monitoramento e avaliação hidrogeológica que é a chave para obtenção de uma base de dados devidamente contextualizada com os estudos ambientais das águas superficiais e subterrâneas, contribuindo com as etapas de implantação de uma usina hidrelétrica.

A Figura 6 apresenta uma proposta de Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológica, que compõe uma ferramenta que vem ao encontro de solucionar eficazmente o problema específico geotécnico apresentado neste trabalho. A proposta abrange aspectos necessários para o monitoramento com a vantagem de poder ser integrado a outras atividades do empreendimento, resultando em benefícios mútuos dos estudos desde o planejamento, até a instalação e operação da usina.

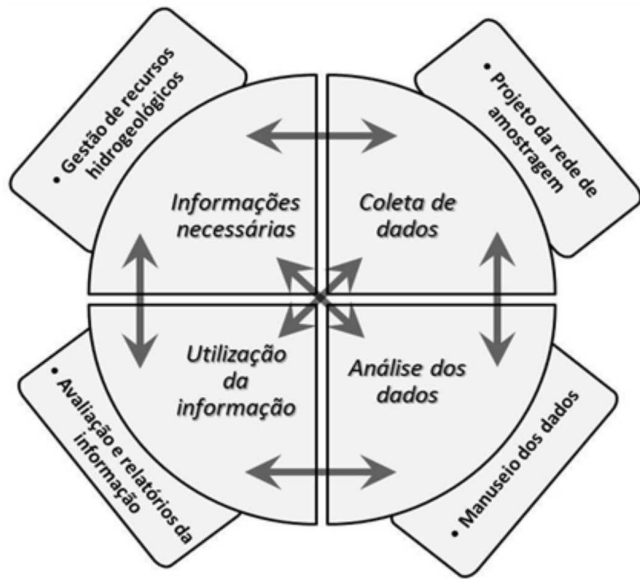


Figura 6. Ciclo de Monitoramento e Avaliação em Hidrogeologia. Observar que as diferentes componentes do ciclo podem ser comutadas em diferentes momentos de aplicação do método cíclico.

O ciclo proposto fortalece os esforços em andamento e situa atividades propostas de forma providencial em um dos seus componentes, o que proporcionará incentivo, continuidade e organização como um todo e o mais interessante é o autoaprendizado com a possibilidade da retroalimentação que o ciclo pode proporcionar. Esta proposta é contrastante com os métodos de monitoramento existentes, que são lineares, isto é, apresentam estudos iniciais e são concluídos ao final de um ciclo de vida dos empreendimentos.

A forma cíclica conduz, à verificação de quanto os objetivos da gestão foram atingidos, possibilitando o retorno à etapas anteriores para se aproveitar de forma dinâmica as diferentes ações do monitoramento. Essa organização é racional e permite repassar tarefa por tarefa identificando onde especificamente pode-se aprimorar.

Diversas são as vantagens institucionais em se implantar tal estratégia, que pode possibilitar cooperações, convênios, contratos e parcerias entre diferentes órgãos gestores e o envolvimento destes com as tarefas que melhor lhes adaptarem. Dentre as organizações envolvidas destacam-se aquelas vinculadas ao licenciamento ambiental, de outorga de recursos hídricos, ministério público e associações de usuários.

Apesar de o ciclo deixar a critério do profissional por onde se deve iniciar o processo de monitoramento, o que normalmente ocorre é que o primeiro componente do ciclo seja representado pelas *Informações Necessárias*. Neste caso, a Gestão de Recursos Hidrogeológicos deve incluir as variáveis técnicas específicas que deverão ser trabalhadas.

Esse componente é chave para o sucesso de um projeto e é destacado em diversas discussões técnicas, sendo o principal causador do fracasso de não se alcançar a sustentabilidade ambiental quando as variáveis para o escopo da gestão não são adequadamente definidas (Chilton & Foster, 1996).

Após o adequado estabelecimento desta etapa, parte-se para o próximo componente do ciclo, que é representado pela *Coleta de Dados*. Entretanto, para este componente é necessário um projeto da rede amostral (com definições de locais de instalação dos poços, quais variáveis serão medidas e analisadas, frequência do monitoramento, custos de instalação e operação, responsáveis técnicos pela coleta e interpretação dos dados, período de realização do monitoramento entre outras), com avaliação da estratégia e programação das atividades antes de sair a campo para a coleta de dados.

Em seguida, o próximo componente é a *Análise dos Dados* com a organização em tabelas, diagramas, blocos diagramas etc., de tal forma que possam ser manuseados de acordo com os interesses dos envolvidos e objetivos do monitoramento, nas diferentes etapas dos empreendimentos (projetos, instalação e operação).

O último componente é a *Utilização das Informações* que deve ser precedida pela preparação, discussão e conclusão, sendo apresentada por meio de sumários executivos ou relatórios técnicos de forma que conduzam aos interesses da gestão.

4 CICLO DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA EM PROCESSOS INSTABILIZATÓRIOS

Albuquerque *et al.* (2004) reforçam que para avaliações das consequências da elevação do nível

do freático devido ao surgimento do reservatório, duas intervenções são necessárias: a realização do planejamento e o estabelecimento de uma rede de monitoramento no bojo do processo da avaliação de impacto ambiental do empreendimento.

Diante disso serão apresentadas intervenções de monitoramento e avaliação práticas para um arranjo de tarefas que devem obedecer ao Ciclo de Monitoramento e Avaliação Hidrogeológico proposto.

Esse novo arranjo prestigia a rede de amostragem, normalmente a parte mais onerosa, de um projeto de monitoramento e avaliação, respeitando as suas técnicas bem estabelecidas e conhecidas, em uma interface com as outras tarefas, garantindo, assim, a formatação ideal para a produção e utilização da informação para diversos usuários.

A sugestão é que o projeto acompanhe uma sequência de componentes do ciclo cujo início é especificar as informações necessárias, que são dados e informações técnicas para serem encaminhadas para o próximo componente que é coleta de dados. Em outros termos, são questões traduzidas a partir dos objetivos da gestão que derivarão vários aspectos como de planejamento envolvendo: rede amostral, medições, amostragens entre outros.

Uma questão prática relacionada aos trabalhos de monitoramento e avaliação é a dificuldade de contratação dos serviços. Como não se trata dos principais objetivos dos empreendedores e investidores em geração hidrelétrica, esta etapa que se inicia no planejamento e migra até a operação dos empreendimentos é contratada por licitações ou cartas-convite. Neste sentido, as ações a serem executadas devem estar claras nos editais ou termos de referência para contratação de empresas ou consultorias especializadas, de forma que todas as atividades essenciais sejam contempladas.

Normalmente os termos contratuais são concentrados na coleta de dados, e cabe ao projetista propor o ciclo de monitoramento para sua própria organização, ao longo da evolução do cronograma do empreendimento.

Considerando que a gestão é o objetivo central do monitoramento, devem ser destacados os seguintes aspectos: informações necessárias, coleta de dados, análise dos dados e utilização

da informação. Estes parâmetros serão a seguir detalhados.

4.1 Informações Necessárias

Quando a gestão de recursos hidrogeológicos objetiva avaliar os impactos geotécnicos nas edificações vizinhas ao reservatório de uma usina hidrelétrica, os estudos técnicos devem focar na elevação do lençol freático e como este fator impacta nas variáveis a serem consideradas. Neste sentido, a elevação do nível da água subterrânea deve ser estudada e todas as suas dimensões: elevação total; taxa de elevação; separação da flutuação natural com relação à elevação devida à formação do reservatório; relação da qualidade da água freática antes e depois da formação do reservatório; dentre outros aspectos.

Campos *et al.* (2019) destacam que as principais variáveis que controlam a elevação dos níveis das águas subterrâneas nas áreas marginais aos reservatórios incluem: declividade do terreno na orla do reservatório, tipos de materiais que compõem o aquífero e profundidade original do freático, bem como a elevação total da lâmina d'água do rio natural com relação ao reservatório atual.

Nas áreas identificadas como potencialmente impactadas, a natureza do material que compõe o aquífero é fundamental. Os principais parâmetros que devem ser conhecidos são a condutividade hidráulica das zonas vadosa e saturada e a espessura. Para a obtenção da condutividade hidráulica da zona não saturada os métodos sugeridos são ensaios de infiltração *in situ*, incluindo o infiltrômetro de anéis concêntricos em superfície e a técnica *open end hole* para diferentes profundidades (Oliveira *et al.*, 2021). Para a zona saturada o ensaio tipo *Slug and Bail Test* em poços de monitoramento são os mais adequados.

Com relação às patologias geotécnicas, um caso de destaque é utilizado para exemplificar o tipo de informação necessária. O programa ambiental da UHE Peixe Angical (CDT/UnB, 2008a) cadastrou centenas de edificações e levantou as patologias existentes antes do início das obras de construção do barramento em três áreas urbanas situadas na futura orla do reservatório. As fissuras, trincas e rachaduras em edificações foram

monitoradas durante e depois do enchimento do reservatório, de forma que se pudessem separar aquelas existentes que eventualmente sofressem reativações ou novos processos, após a formação do reservatório e operação da usina. Além deste cadastramento, os solos passíveis de colapso com a elevação do lençol freático foram estudados, gerando mapas de materiais com a caracterização física dos solos.

Poços existentes (cisternas e tubulares) podem ser utilizados como dispositivos para observação da variação do nível d'água com registro da piezometria ao longo do tempo. Contudo, a instalação de poços de monitoramento dedicados exclusivamente com o objetivo de medição periódica dos níveis deve ser sempre obrigatória.

É fundamental incluir no início dos estudos, para a gestão hidrogeológica a modelagem conceitual do aquífero caracterizando sua homogeneidade ou heterogeneidade, isotropia ou anisotropia, bem como os parâmetros dimensionais condutividade hidráulica, espessura, número de camadas e condições de recarga. Dessa forma, são identificadas as unidades hidroestratigráficas e os parâmetros hidrogeológicos associados a cada unidade identificada (Lousada & Campos, 2005).

No Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas (MME/CEPEL, 2007), as informações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e geotécnicas são requeridas nos estudos. Entretanto, o manual é voltado para análise da instabilidade natural de encostas nas adjacências do reservatório e definição das áreas com susceptibilidade à erosão.

4.2 Coleta de Dados

Componente do ciclo que inclui diferentes atividades, incluindo: seleção das variáveis, locais, frequência, medidas em campo e análises laboratoriais, além da metodologia de obtenção dos dados e responsáveis técnicos pela execução. Entretanto, tudo deve ser realizado sob um arcabouço de um projeto da rede de amostragem, chave para melhor aproveitamento do monitoramento e avaliação, pois com a informação necessária pré-definida o projeto se adequa de tal maneira que os resultados podem ser utilizados de forma

global. Neste caso, o projeto de monitoramento tenderá a ser sob medida atendendo às particularidades locais e regionais.

Sempre é importante lembrar que o projeto da rede de amostragem deve ser adequado para condições: pré-enchimento, durante o enchimento e posterior ao enchimento do reservatório, considerando o zoneamento do potencial de sua influência e as características do uso e ocupação de sua orla (Albuquerque, 2002). Este autor enfatiza a realização das frequências de amostragens dentro do ciclo hidrológico na época da implantação da usina hidrelétrica, o que coincide com as recomendações das campanhas hidrológicas.

É a oportunidade de se definir a modelagem conceitual dos aquíferos locais que não seria somente uma ferramenta para simular a elevação do lençol freático, mas também apoio como para a definição da rede e posterior operação, trazendo seu uso ao longo da existência dos estudos.

Para a coleta de dados hidrogeológicos, os poços de monitoramento são imprescindíveis. Segundo Feitosa *et al.* (2008) dependendo dos objetivos dos estudos os poços podem ser de diferentes formas: poço estratigráfico, produtor, de pesquisa ou de observação. De forma geral, os poços de monitoramento em estudos de hidrelétricas devem ter seção curta de filtro e a máxima penetração possível na zona saturada do aquífero para ter funcionalidade a qualquer momento do ciclo hidrológico (de forma que sejam funcionais mesmo quando o nível freático for mais baixo). A locação dos poços deve ser realizada na fase de implantação da UHE levando-se em consideração a linha máxima da lâmina d'água após a estabilização do reservatório.

Com relação aos solos dois tipos de informações são necessários: distribuição dos tipos de coberturas ou materiais geotécnicos e dados intrínsecos dos diferentes tipos de materiais. Para o primeiro caso é necessário confeccionar mapas de solos ou de materiais geotécnicos segundo critérios específicos (pedológicos ou geotécnicos). Este mapa deve ter escala apropriada, em geral, de grande resolução espacial, com detalhamento suficiente para se compreender as mudanças laterais dos materiais e suas transições. Com relação aos dados intrínsecos dos perfis de solos ou dos materiais em estudo são necessárias coletas de

amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas são úteis para obtenção de dados como textura, estrutura, pegajosidade, plasticidade, dentre outras, a partir de análise tátil-visual de campo e de análises laboratoriais. As amostras indeformadas são necessárias para produção de dados de erodibilidade, colapsividade, densidade, porosidade, e outras a partir de ensaios geotécnicos específicos.

Os equipamentos e ferramentas que devem ser utilizadas durante as atividades de campo devem incluir: GPS portátil; máquina fotográfica; paquímetro; caderneta; cola tipo resina e lâmina de vidro (espessura 1 mm e comprimento 5 cm para auxiliar no monitoramento de trincas), medidor de nível (com sensor sonoro) e medidor portátil de pH e condutividade elétrica da água.

Além das informações anteriormente enumeradas, outros dados e elementos vinculados à hidrogeologia devem ser considerados, para obtenção de variáveis incluindo a mudança sazonal do nível freático, quantificação da recarga, porosidade total e efetiva do meio, vazão de descarga do aquífero e gradiente hidráulico (Scanlon *et al.* 2002).

4.3 Análise dos Dados

Este componente é onde os dados produzidos são convertidos nas informações necessárias, que por sua vez estão associadas com os objetivos da gestão hidrogeológica. É o momento para se validar, tornar acessível, arquivar, facilitar a análise espacial e temporal a partir de uma variedade de fontes (caracterização geotécnica dos solos, relevo, hidrologia, clima, hidrogeologia, geologia).

Para os trabalhos de geotecnia, produtos planialtimétricos e hidrogeológicos devem ser elaborados, tais como: mapa de profundidade do nível d'água subterrânea; mapa potenciométrico do sistema aquífero livre; carta de zoneamento de potencial de influência do enchimento do reservatório sobre o aquífero livre adjacente (Albuquerque, 2002); carta geotécnica, mapa de solos, e os mapas derivados (potencial de recarga, potencial de perda de solos, distribuição dos solos colapsíveis etc.).

Como já referido a declividade, nível d'água do reservatório e tipos de materiais são parâmetros a serem avaliados de forma a se evidenciar as principais feições geotécnicas.

Os dados obtidos na componente anterior devem ser analisados e avaliados a partir de ferramentas adequadas, que incluem o saneamento dos dados, plotagem em diagramas específicos (Piper, Stiff ou Shoeller), até o uso de softwares específicos para aplicações hidrogeológicas e geotécnicas. De maneira geral, os dados deverão ser armazenados em formato digital e a análises de dados, na maioria das vezes representadas por operações estatísticas, pode fazer uso de pacotes de software genéricos. Para obter uma análise de dados automatizada padrão, recomenda-se o uso do software proposto pela Comunidade Europeia (UN/ECE, 2006).

4.4 Utilização da Informação

Este último componente é o momento da conexão entre a informação e os usuários, sendo fundamental que seja dirigida à audiência a que se destina. No caso deste estudo, os principais interesses dos tomadores de decisão incluem: *i*) qual população ou quais edificações devem ser realocadas? *ii*) onde implantar ou não reforços estruturais e preenchimento de fendas em edificações afetadas pela elevação do nível freático? *iii*) se as patologias são vinculadas à elevação do nível freático ou relacionadas à problemas construtivos sem conexão com mudanças dos níveis freáticos (Campos *et al.*, 2019). Desta forma não será uma mera lista de variáveis e concentrações ou níveis, mas interpretadas e avaliadas por equipe experiente com relevantes recomendações para ações gerenciais (UN/ECE, 2006).

Os usuários desta informação poderão estabelecer critérios de mitigação diferenciados para as edificações convencionais e não convencionais. Outras medidas incluem: desapropriações caso constata-se comprometimento irremediável da edificação e planejamento para ocupação das margens do reservatório.

Comumente as informações e dados produzidos são utilizados em estudos ambientais ou para subsidiar audiências públicas e é a oportunidade

para se verificar o quanto os objetivos foram contemplados. Além dos usuários mais diretos das informações, devem-se avaliar as possibilidades de outros segmentos desfrutarem desse projeto, como, por exemplo, técnicos de prefeituras municipais ou para pesquisas acadêmicas.

Cruz *et al.* (*apud* Albuquerque, 2002) realizaram estudos cujos resultados do modelo eram aferidos com os efeitos constatados aprimorando-se a prevenção e mitigação dos efeitos da instalação do reservatório sobre as edificações de áreas urbanas. Essa aferição, independente do uso de ferramentas previsionais, é oportuno para se decidir em quais componentes do ciclo deve-se incluir ações de complementaridade das atividades.

5 CONCLUSÕES

O tipo de ação de monitoramento e avaliação proposto neste trabalho deve ser aplicado para o uso futuro e ocupação das terras no entorno dos reservatórios formados para usinas hidrelétricas. Sugere-se integrar os trabalhos de interesse geotécnico direto com outros estudos de cunho hidrogeológico, com execução de retroanálises dos efeitos do enchimento e quando necessário estender o período de monitoramento. Os estudos hidrogeológicos e geotécnicos não são propriamente mutuamente excludentes, e no caso de monitoramento em hidrelétricas são inseridos em uma única ciência que pode ser denominada hidrogeotecnia.

Este trabalho propõe uma inversão da lógica atualmente aplicada em muitos projetos de UHEs, com relação aos solos colapsíveis, em que as medidas preventivas são desconsideradas ou consideradas de forma insuficiente para posteriormente se investir em medidas corretivas, em geral muito mais onerosas. Neste sentido, os projetos de monitoramento e avaliação devem ter como objetivo antever os impactos geotécnicos e hidrogeológicos.

As soluções dos problemas geotécnicos e hidrogeológicos podem ser potencializadas com a aplicação adequada de uma metodologia estratégica que siga regras desde as etapas iniciais de implantação de uma UHE. A aplicação desta estratégia pode resultar na minimização do desenvolvimento de danos permanentes, conforme casos mencionados neste trabalho.

Para o caso de instalação de UHEs com reservatórios com dimensões significativas os programas de monitoramento e avaliação devem ser permanentes com campanhas realizadas antes, durante e após o enchimento do lago artificial. Os objetivos devem ser definidos inicialmente, antes do início das obras, já nas fases de projetos executivos e estudos ambientais prévios.

A aplicação do projeto de monitoramento e avaliação no formato cíclico, como proposto por este trabalho apresenta a vantagem de permitir a reavaliação de cada componente em qualquer momento em que se considere necessário. Novas etapas de coletas de dados ou mudanças de periodicidade das medições podem ser propostas. Da mesma forma, pode-se mudar a estratégia para a análise dos dados incluindo, por exemplo, avaliações estatísticas do conjunto de dados amostrais.

O fortalecimento das ações preventivas deve ser prioridade e o importante dessa estratégia metodológica é a racionalidade no uso de soluções para se alcançar as soluções mitigadoras.

Evidentemente a composição de equipes experientes com amplo conhecimento em geologia, geotecnia, pedologia, estruturas civis entre outras devem ser formadas. As equipes devem ter a máxima independência possível, de forma a não ceder às pressões que apresentam três origens principais: políticas (interesses do poder público), econômicas (interesses dos empreendedores) e sociais (interesses da população envolvida).

Para se maximizar as vantagens da aplicação do sistema cíclico de monitoramento e avaliação deve-se definir uma rede amostral adequada, com a proposição de escalas de estudos que sejam compatíveis com os problemas geotécnicos e hidrogeológicos. A escala deve ser pensada em termos espaciais (em geral 1:25.000 ou maiores) e em termos temporais (em geral com observações mensais). Para o caso das avaliações geotécnicas, deve se considerar, no mínimo, uma amostra e a descrição de um perfil para cada de solo ou de material geotécnico mapeado.

Embora sejam importantes as análises de dados existentes (publicados ou não), os trabalhos de campo para coleta de dados são imprescindíveis. Sem as visitas periódicas às áreas de estudo não é possível alcançar nenhum dos objetivos

enumerados no modelo de monitoramento e avaliação proposto.

Por fim, o conhecimento da amplitude de influência da elevação do nível freático será uma informação fundamental na decisão de implantar restrições geotécnicas à ocupação urbana nas áreas marginais ao reservatório.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, J.L. Previsão e análise da elevação do nível do lençol freático na Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) de reservatórios hidrelétricos. Tese (Doutorado). Rio Claro-SP: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2002. 222p.
- ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; BOLZACHINI, E.; KITAHARA, S.M. Monitoramento hidrogeológico do aquífero livre nas margens do reservatório de Porto Primavera implantado no Rio Paraná, divisa dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2004. 11p.
- BRUNO, A.F.C. A paisagem da cidade de Pereira Barreto/SP vista a partir das transformações ocorridas no Rio Tietê. Dissertação (Mestrado). Bauru-SP: Universidade Estadual Paulista, 2019. 112p.
- CAMPOS, J.E.G.; BESSA, M. da R.M.; AUGUSTO, V.A.; GOMES, A.W.; OLIVEIRA, G.N.R. Ascensão do nível freático no entorno de reservatórios em hidrelétricas: impactos e propostas de medidas mitigadoras. In: XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Foz do Iguaçu-PR, 2019. 9p.
- CENTRO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO - CDT/UnB. RELATÓRIO FINAL - VOLUME I - Programa Ambiental 05 - Monitoramento das Encostas Marginais Programa Ambiental 06 - Monitoramento Hidrogeológico - AHE Peixe Angical. Brasília-DF, 2008a. 63p.
- CENTRO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO - CDT/UnB. RELATÓRIO FINAL - VOLUME II - Programa Ambiental 05 - Monitoramento das Encostas Marginais Programa Ambiental 06 - Monitoramento Hidrogeológico - AHE Peixe Angical. Brasília-DF, 2008b. 316p.
- CHILTON, P.J.; FOSTER, S.S.D. Monitoring for groundwater quality assessment: current constraints and future strategies. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP MONITORING TAILOR-MADE II. Nupspeet-The Netherlands, p.53-64, 1996.
- FEITOSA, F.A.C. (Coord.) *et al.* Hidrogeologia: Conceitos e aplicações. 3. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM; Recife: LABHID, 2008. 812p. il., color.
- FREEZE, A.R.; CHERRY, J.A. Água Subterrânea. Tradução de Everton de Oliveira et al. Edição Instituto Água Sustentável. São Paulo, 2017. 698p.
- LEITE, C.B.B. Avaliação do impacto do reservatório de Três Irmãos sobre a superfície potenciométrica do aquífero livre na cidade de Pereira Barreto (SP): uma abordagem numérica e geoestatística. Tese (Doutorado). Rio Claro-SP. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2005. xii, 214p.
- LOUSADA, E.O.; CAMPOS, J.E.G. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 3, p. 407-414, 2005.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - CEPEL. Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas. Rio de Janeiro-RJ, 2007. 684p.
- OLIVEIRA, G.N.R.; CAMPOS, J.E.G.; GOMES, A.W.; MOURA, F.G. Caracterização hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. Anuário do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 44, 36700, 2021.
- RODRIGUES, R.A.; VILAR, O.M. Colapso de solo desencadeando pela elevação do nível d'água. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, v. 01, n. 06, p. 13-27, 2013.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying

groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 18-39, 2002.

SIQUEIRA, F.B.; dos SANTOS, M.A. Solutions proposed for socio-environmental conflicts and concerning multiple-use hydroelectric reservoirs in Brazil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 40:e13645, 2021.

UN/ECE. Guidelines on monitoring and assessment of transboundary groundwaters. International groundwater resources assessment Centre. Editorial assistance was given by the UN/ECE Secretariat, members of the Core Group on Ground-

water and Ilonka Záborszky, Utrecht-The Netherlands, 2006. 166p.

VILAR, O.M.; FERREIRA, S.R.M. Solos colapsíveis e expansivos. In: Solos não saturados no contexto geotécnico. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, São Paulo. p. 415-436, 2015.

VILAR, O.M.; RODRIGUES, R.A. Collapse behavior of soil in a Brazilian region affected by a rising water table. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 48 (2), p. 226-233, 2011.