



ISSN: 2230-9926

Available online at <http://www.journalijdr.com>

# IJDR

*International Journal of Development Research*

Vol. 11, Issue, 08, pp. 49246-49252, August, 2021

<https://doi.org/10.37118/ijdr.22448.08.2021>



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

## METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

Junior Joel Dewes<sup>\*1</sup>, Rita dos Santos Sousa<sup>2</sup>, Fabrício Jaques Sutili<sup>3</sup> and Cid Ionceck<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Avenida Roraima, 1000, Centro de Ciências Rurais, prédio 44 N, Camobi, CEP 97105-9700, Santa Maria (RS). <sup>2</sup>Pós-Doutoranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). <sup>3</sup>Professor, Centro de Ciências Rurais, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), <sup>4</sup>Engenheiro Ambiental, Analista de Meio Ambiente, Engie BrasilEnergia, Regional Rio Uruguai, UsinaHidrelétrica Itá, Itá (SC)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 10<sup>th</sup> May, 2021

Received in revised form

22<sup>nd</sup> June, 2021

Accepted 04<sup>th</sup> July, 2021

Published online 26<sup>th</sup> August, 2021

#### Key Words:

Seções topográficas,  
Dinâmica lacustre,  
Faixa de oscilação da água, Perda de solo.

#### \*Corresponding author:

Junior Joel Dewes

### ABSTRACT

O monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios brasileiros é praticamente inexistente e os métodos de medição existentes são inapropriados para o desenvolvimento de estudos neste tipo de ambiente. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia ágil de monitoramento de processos erosivos em larga escala em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas. A metodologia proposta consiste de três etapas, nomeadamente Planejamento Inicial, Monitoramento Topográfico e Análise de Dados. Na primeira etapa é realizada uma visita técnica de reconhecimento do reservatório. As informações coletadas são analisadas posteriormente durante o planejamento de escritório. A segunda etapa consiste no planejamento logístico, seguido das atividades de instalação de seções topográficas a campo para o monitoramento dos trechos com erosão. Nesta atividade são utilizados equipamentos topográficos (Sistema RTK e/ou estação total) para a coleta de pontos topográficos no local alvo de monitoramento. A terceira etapa consiste no processamento dos dados topográficos obtidos na etapa anterior e na análise dos perfis topográficos resultantes em escritório. A metodologia prevê a execução de várias campanhas de monitoramento, de modo que a perda de solo medida entre perfis topográficos sucessivos possa ser determinada. O intervalo de tempo recomendado entre campanhas é de 12 (doze) meses. Com a metodologia proposta pretende-se impulsionar a implantação de monitoramentos contínuos de erosões no setor hidrelétrico, além de sensibilizar os setores empresariais, fiscalizatórios e acadêmicos sobre esta problemática em reservatórios de água.

Copyright © 2021, Junior Joel Dewes et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Citation: Junior Joel Dewes, Rita dos Santos Sousa, Fabrício Jaques Sutili and Cid Ionceck. "Metodologia para monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas", *International Journal of Development Research*, 11, (08), 49246-49252.

## INTRODUÇÃO

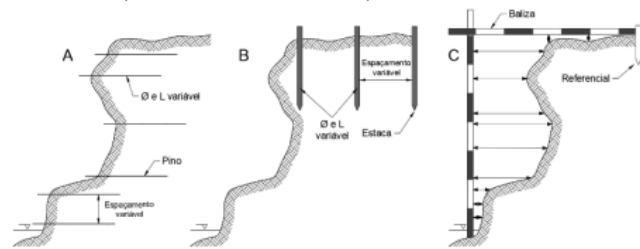
O Brasil detém o terceiro maior potencialhidrelétrico tecnicamente aproveitável do mundo (260.000 Megawatts (10%) (ANEEL, 2008)), menor apenas que o potencial da China (13%) e da Rússia (12%) (TOLMASQUIM, 2005). Esta abundância de recursos hídricos, associada a uma demanda crescente por água e energia tem intensificado a execução de projetos hidrelétricos nas últimas décadas (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017), cuja tendência se deve manter no futuro próximo (ROCHA; PASE, 2015).

A construção de empreendimentos hidrelétricos com a consequente formação artificial de grandes reservatórios de água provoca grandes alterações no espaço onde o empreendimento se encontra. Um impacto direto é a erosão de solo verificada com frequência na zona de oscilação do nível de operação do reservatório. Estas erosões são desencadeadas principalmente pelas ondas formadas na superfície da água (NRCS, 2014) e pela oscilação sazonal do nível do reservatório (NASCIMENTO et al., 2017). A perda de solo nas margens é um impacto indesejável, pois resulta na diminuição da qualidade da água (TANG et al., 2014), no assoreamento e redução da vida útil do reservatório (PANDEY; CHOWDARY; MAL, 2007), na redução da faixa mínima obrigatória de Área de Preservação Permanente (APP)

ao longo do perímetro do reservatório (DEWES, 2019), entre outros. Diante da tendência de intensificação da exploração do potencial hídrico brasileiro e, considerando a preocupação mundial crescente pela manutenção dos recursos naturais e do meio ambiente, ganha impulso a necessidade de implantação de monitoramentos quantitativos contínuos de erosões em margens de reservatórios de água, especialmente os de aproveitamento hidrelétrico. Os métodos de monitoramento de erosões existentes são o método dos pinos, o método das estacas e o método das perfilagens sucessivas (ELLIOTT, 1991; GATTO, 1988; REID, 1984). Estes métodos foram originalmente desenvolvidos para aplicações em taludes fluviais e, portanto, apresentam algumas desvantagens para o monitoramento de taludes lacustres. Ademais, o método empregado no monitoramento de ambientes lacustres deve considerar aspectos como dimensão do reservatório, ausência de manutenção, facilidade na coleta e processamento dos dados, deslocamento via lacustre, aspectos logísticos (TOMMASELLI et al., 2014), condições fisionômicas e geotécnicas das margens, quantidade reduzida de materiais e de mão de obra e recursos financeiros disponíveis. Estes aspectos, total ou parcialmente, não conseguem ser contemplados pelos métodos existentes, conforme será descrito mais adiante. Diante da ausência de um método de monitoramento adequado, este trabalho pretende propor uma metodologia que integre os princípios de aplicação dos três métodos citados acima, mas que apresente maior versatilidade e agilidade de execução. Este trabalho pretende ainda destacar a importância do monitoramento de erosões em reservatórios brasileiros, o qual ainda é muito incipiente, perante os setores empresariais, fiscalizatórios e acadêmicos. O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia ágil de monitoramento de processos erosivos em larga escala em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas.

**Métodos Tradicionais de Monitoramento Direto de Erosões:** Os métodos de monitoramento de erosões mais frequentemente utilizados são o método dos pinos, o método das estacas e o método das perfilagens sucessivas. Estes métodos foram desenvolvidos especialmente para aplicações em ambiente fluvial, e serão abordados em maiores detalhes a seguir.

**Método dos pinos:** O método dos pinos de erosão consiste na cravação de pilotos na face dos taludes, mantendo uma porção de seu comprimento exposta, de modo que o recuo da margem possa ser mensurado em cada período entre campanhas sucessivas de medição (CORREA; FILHO, 2009; CURRAN, 2001). A diferença de exposição dos pinos entre duas campanhas sucessivas representa a evolução da margem, e é utilizada para estimar o volume de solo erodido do talude (BORGES, 2004; COUPER; STOTT; MADDOCK, 2002). O espaçamento, bem como as características dos materiais construtivos e dimensões dos pinos (Figura 1A) não são padronizados e variam consideravelmente de estudo para estudo. O intervalo entre medições sucessivas também é variável, o qual costuma ser tanto menor quanto maior é a velocidade de recuo da margem, para que não ocorra perda de pinos de medição. Quando o recuo da margem é maior que 0,80 m/mês, o método dos pinos não apresenta resultados satisfatórios e necessita ser conjugado com outros métodos, como o das estacas (SOUZA; CUNHA, 2007).



**Figura 1. Representação esquemática do (A) método dos pinos; (B) método das estacas e (C) método das perfilagens sucessivas (adaptado de HUDSON, 1982)**

As grandes vantagens do uso deste método é a sua simplicidade, facilidade e baixo custo de implantação, aliado à flexibilidade de monitoramento de taludes com fisionomias variadas (LAWLER, 1993b; RUBIO, 2014). A precisão das medições periódicas dos pinos

permite uma boa estimativa da quantidade de solo erodido (THORNE, 1981). No entanto, o método apresenta algumas desvantagens e limitações. Uma desvantagem é a movimentação que ocorre nos pinos em casos de deslizamentos de solo nos taludes em monitoramento (BARTLEY et al., 2006; BORGES, 2004; FERNANDEZ, 1996; SOUZA; CUNHA, 2007), resultando na perda do controle das medições. A mesma limitação é verificada em taludes que apresentam movimentos lentos (*creep*), os quais tendem a arquear ou movimentar os pinos (FERNANDEZ, 1996), resultando em imprecisões na estimativa de solo erodido. A movimentação dos pinos também pode ocorrer em função de pressões hidrostáticas desenvolvidas dentro do talude durante o inverno devido ao congelamento da água (HAIGH, 1977; HUDSON, 1982). O soterramento dos pinos na base do talude devido a movimentações e deposição de solo também pode resultar em imprecisões nas medições (HAIGH, 1977). Outra limitação do método reside na utilização de pinos de aço, cujo material desenvolve ferrugem com o passar do tempo, estabelecendo uma forte ligação do pino com o solo adjacente (BRIDGES; HARDING, 1971 apud COUPER et al., 2002), formando uma estrutura resistente que pode subestimar a erosão atuante. Os pinos também podem alterar a resistência ao cisalhamento do solo, pois exercem função estruturante quando cravados no talude (THORNE, 1981). Além disso, os pinos estão sujeitos a atos de vandalismo (arranquio, dobra ou cravação) (HAIGH, 1977), acarretando na perda da qualidade e precisão das medições.

**Método das estacas:** O método consiste na instalação de estacas (pilotos de madeira (BORGES, 2004; SILVA et al., 2007) ou de metal (GATTO, 1988; REID, 1984)) no topo do talude (Figura 1B). A instalação das estacas é realizada em múltiplas linhas paralelas à margem e a uma distância conhecida da crista do talude. A faixa com estacas é variável e proporcional à velocidade de recuo das margens (GATTO, 1988; JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013). O recuo da margem é obtido periodicamente através da medição da distância entre as linhas de estacas e a crista do talude. O espaçamento, as características dos materiais construtivos e as dimensões das estacas, bem como o intervalo adotado entre medições sucessivas são variáveis e não padronizados, assim como no método dos pinos descrito anteriormente. Diferentemente do método dos pinos, o método das estacas proporciona uma avaliação bastante subjetiva da magnitude dos processos erosivos atuantes na face do talude, embora apresente boas estimativas no caso de taludes verticais com recuos uniformes (BORGES, 2004). No entanto, esta condição poucas vezes é encontrada na prática a campo. Outra desvantagem do método é a possibilidade de perda de estacas, e, por conseguinte, do controle das medições, em casos de deslizamento de solo e/ou vandalismo.

**Método das perfilagens sucessivas:** Este método permite a caracterização espaço-temporal do recuo da margem através de perfilagens sucessivas da face do talude (BORGES, 2004; CASADO et al., 2002; CORREA; SOUZA FILHO, 2009; HUDSON, 1982). A caracterização do talude é realizada por meio do posicionamento de uma baliza na horizontal (referenciada a um marco conhecido) e outra na vertical, formando um ângulo reto entre elas e englobando o talude alvo de monitoramento (Figura 1C). A seguir são tomados comprimentos horizontais e verticais a partir das balizas, sendo o número de pontos levantados variável conforme precisão desejada (HUDSON, 1982). Ao final do processo obtém-se o perfil transversal do talude analisado. A vantagem deste método é o seu baixo custo de levantamento e obtenção de dados. No entanto, o método permite obter somente a representação da morfologia da face do talude. Para uma medição precisa da morfologia do terreno natural a partir da crista do talude, necessita-se a conjugação com outros métodos. Outra limitação é a pequena altura do talude que pode ser monitorado, de modo que a tomada de dados seja realizada de forma correta e segura (HUDSON, 1982).

**Limitações Técnicas Dos Métodos Tradicionais De Medição Para Aplicações Em Reservatórios De Água:** Com base no exposto, verifica-se que os métodos tradicionais apresentam várias limitações

técnicas de medição a campo quando aplicados em reservatórios. As principais limitações identificadas são:

- Suscetibilidade à perda de unidades de medição por vandalismo e/ou movimentações de solo;
- Alteração das condições de resistência mecânica do talude;
- Alteração das condições hidráulicas na face do talude (turbilhonamentos);
- Alterações físicas e químicas de unidades de medição (movimentações, ferrugem);
- Necessidade de manutenção frequente;
- Limitação da altura do talude a monitorar;
- Grande quantidade de materiais (pinos e estacas);
- Ausência de normas e especificações padronizadas de medição;
- Monitoramento de um único segmento do terreno por método;
- Necessidade de conjugação de métodos para medições mais precisas;

Muitas das limitações técnicas elencadas acima podem afetar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos, além de onerar o processo de monitoramento. Desta forma, e considerando a especificidade e dinâmica lacustre, os métodos apresentados não atendem com eficácia às necessidades de monitoramento deste tipo de ambiente em larga escala. Portanto, fica explícita a demanda por uma metodologia mais eficiente e ágil que contemple os seguintes requisitos:

- Extensão do reservatório;
- Monitoramento de diferentes segmentos do terreno (terreno natural, talude superior e talude inferior);
- Deslocamento por via lacustre;
- Reduzida quantidade de materiais, equipamentos e mão de obra;
- Dispensa de manutenção e baixo custo médio por local monitorado;
- Agilidade e acurácia no levantamento dos dados;
- Rapidez e facilidade de processamento dos dados levantados.

Elencadas as particularidades a serem observadas no monitoramento de erosões em larga escala em reservatórios, serão apresentadas e detalhadas as etapas, atividades e tarefas da metodologia proposta que atendem a esses requisitos e demandas.

**Proposta de Metodologia para Monitoramento Quantitativo de Erosões em Reservatórios de água:** A proposta de metodologia de monitoramento considera a execução de três etapas, nomeadamente *Planejamento Inicial*, *Monitoramento Topográfico* e *Análise de Dados*. Cada etapa abrange atividades, que por sua vez, prevêem um conjunto de tarefas. Ao final da descrição da metodologia é apresentado um fluxograma geral com a compilação das etapas, atividades e tarefas, de modo a facilitar a compreensão da metodologia.

### Planejamento inicial

**Visita técnica de reconhecimento:** A visita de reconhecimento compreende as tarefas de *identificação*, *descrição* e *levantamento fotográfico dos trechos com erosão* evidente (deslizamentos, tombamentos, queda de vegetação, etc) no reservatório. A *identificação dos trechos* deve ser executada percorrendo todo o perímetro do reservatório, identificando-se com coordenadas geográficas os pontos de início e final do trecho com erosão. Estas coordenadas podem ser posteriormente visualizadas em um sistema de informações geográficas em escritório para estudo da espacialização dos trechos no reservatório, obtenção de respectivos comprimentos, além de fornecer informações para o planejamento logístico da próxima etapa, entre outros usos e aplicações. A *descrição dos trechos* com erosão consiste no levantamento de informações complementares acerca das características e condições

atuais. As variáveis mais importantes a serem observadas são a cobertura superficial dos taludes (vegetação arbórea, capoeira, pastagem, presença de materiais inertes); tipo de solo; inclinação (°) e altura dos taludes (m); ocorrência de movimentos de massa; presença de árvores instáveis na crista dos taludes e circulação (ou não) de animais (bovinos, equinos, etc). Concomitantemente à identificação e descrição dos trechos, deverá ser realizado o *levantamento fotográfico* detalhado de cada trecho. Este levantamento objetiva auxiliar na descrição dos respectivos trechos, na divisão dos trechos em subtrechos com características morfológicas similares, quando necessário, e na seleção de pontos representativos (trechos ou subtrechos) para posterior instalação de seções topográficas de monitoramento.

**Planejamento de escritório:** O planejamento de escritório compreende a organização e análise das informações coletadas na visita de reconhecimento. Esta fase compreende as tarefas de *delimitação de subtrechos*, a *determinação de pontos representativos* e a *locação de seções topográficas* de monitoramento. Em função da geologia ou relevo, muitos dos trechos com erosão podem apresentar condições fisionômicas distintas (tipos de solo, zonas com presença de pedras, taludes com alturas e inclinações variadas, etc). Quando um *trecho* apresentar heterogeneidades neste sentido, o mesmo deverá ser *delimitado em subtrechos*, de modo a obter zonas com características similares. A divisão de trechos em subtrechos apresenta relevância do ponto de vista do monitoramento das erosões, já que cada fisionomia apresenta características específicas que podem resultar em diferentes taxas erosivas. Após delimitação dos subtrechos (quando for o caso), é realizada a *determinação de pontos representativos em cada trecho/subtrecho*. Nesta escolha devem ser consideradas principalmente a altura do talude superior e as características do solo. A seguir deve ser realizada a *locação de seções topográficas* nos pontos representativos determinados anteriormente. Esta tarefa consiste na obtenção de coordenadas geográficas (X, Y) dos pontos específicos onde deverão ser instaladas a campo as seções de monitoramento. O quantitativo de trechos/subtrechos monitorados e de seções de monitoramento instaladas permanece a critério dos interessados.

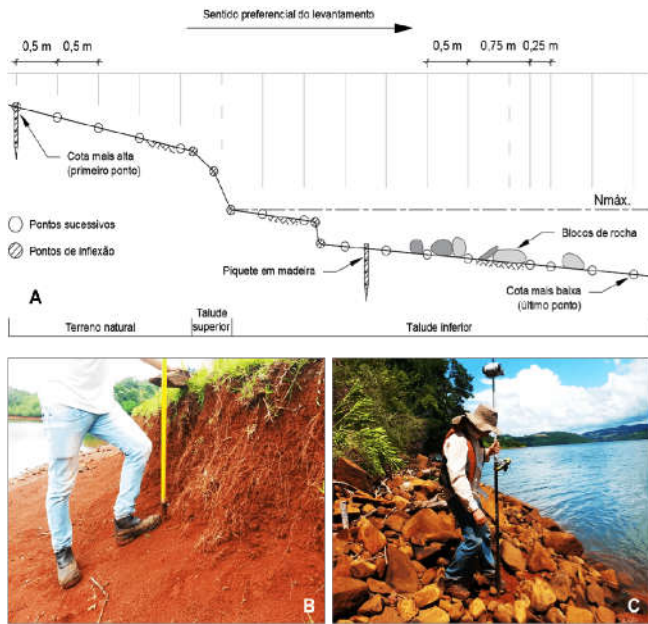
### Monitoramento topográfico

**Planejamento logístico:** O planejamento logístico compreende as tarefas de *planejamento logístico diário*, dimensionamento dos *materiais*, *equipamentos* e *equipe de trabalho* necessário ao levantamento de dados a campo. O *planejamento logístico diário* é especialmente importante quando o quantitativo de pontos a serem monitorados for elevado e o reservatório apresentar grande extensão. Este planejamento deve considerar a distribuição espacial das seções topográficas, dos pontos de acesso (portos) e dos marcos da Rede de Vértices Geodésicos (RVG) distribuídos ao longo do reservatório. A distribuição das seções topográficas deverá ser fornecida em arquivo digital para que o executor de campo possa planejar as atividades subsequentes. Os pontos de acesso (portos) ao reservatório podem ser obtidos diretamente com a empresa operadora do empreendimento hidrelétrico, ou por meio de imagens de satélite. O número de portos e as suas respectivas localizações estarão diretamente dependentes do quantitativo e distribuição espacial das seções topográficas. Por fim, deve-se obter a localização dos marcos RVG distribuídos ao longo do reservatório, os quais serão necessários nas atividades de levantamento topográfico das seções de monitoramento. De posse destas três camadas de informações, deve-se definir a estratégia, o quantitativo de seções diárias a monitorar e o sentido do levantamento (de montante para jusante, ou vice-versa). O conjunto de *materiais* necessários no levantamento diz respeito às atividades de deslocamento e implantação de seções topográficas nas margens do reservatório. Os materiais necessários são:

- **Barco motorizado** com capacidade para 3 a 5 passageiros;
- **Estacas** com numeração de identificação das seções topográficas;







**Figura 5. Procedimento de tomada de pontos sobre a seção topográfica. (A) representação esquemática do procedimento de tomada de pontos sucessivos, (B) detalhe da determinação da base do talude superior e (C) detalhe da coleta de pontos em local com blocos de rocha**

Em caso de presença de blocos de rocha no talude inferior (Figura 5A e C), os pontos topográficos devem ser coletados sobre a superfície do solo nos espaços vazios formados entre eles, ou seja, os blocos não devem ser levantados no perfil da seção topográfica. Isto porque os blocos de rocha conferem cobertura superficial parcial ao talude, protegendo-o do impacto das ondas e da oscilação do nível do reservatório, o que por sua vez, condiciona a intensidade da erosão. Os trechos de margens que apresentam o talude inferior densamente coberto por blocos de rocha geralmente não apresentam erosão evidente ou significativa e, portanto, não necessitam ser monitorados. No entanto, este tipo de ambiente é interessante de ser monitorado, para que suas taxas erosivas possam ser comparadas a trechos de margens sem proteção superficial e/ou com erosão acelerada.

O levantamento das seções topográficas deve ser executado quando o nível do reservatório estiver em uma cota baixa, o que, a depender do regime de operação, coincide com a estação seca na bacia de contribuição. Neste sentido, recomenda-se o intervalo padronizado de um ano entre campanhas sucessivas de monitoramento, o que também favorece a atuação das ondas e do efeito de oscilação do nível do reservatório sobre os taludes. Levantamentos sucessivos realizados em intervalos de tempo menores que o recomendado podem dispendir recursos financeiros desnecessariamente, além da possibilidade de pequenas alterações nos taludes puderem não ser detectadas. A determinação da cota mínima de levantamento deve ser fixada conforme objetivos do monitoramento e antes da primeira campanha de coleta de dados. A época mais adequada, assim como a cota mínima, podem ser definidas por meio da análise das séries históricas de operação do nível do reservatório ao longo do ano. Durante o levantamento de cada seção topográfica recomenda-se que também seja realizado o *registro fotográfico* com detalhes e particularidades do local. Além disso, recomenda-se a realização de *descrição complementar* do local (terreno natural, talude superior e inferior) em uma planilha específica de campo. Na descrição podem ser considerados aspectos técnicos (vegetação, solo, instabilidades geotécnicas) e aspectos sociais (risco a construções, perda de áreas de uso recreativo e/ou econômico) ou outras informações, conforme necessidade e nível de detalhamento desejado. Esta descrição complementa as informações obtidas pelo levantamento topográfico e registro fotográfico e contribui, em muitos casos, para a compreensão das causas da erosão observada.

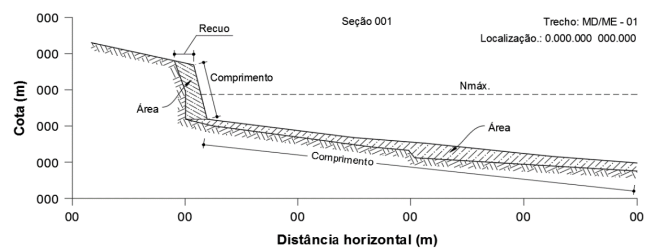
## Análise de dados

**Processamento de dados:** O processamento de dados compreende as tarefas de *transferência de pontos topográficos* para ambiente computacional, *elaboração de perfis topográficos* e *exportação de dados em arquivos editáveis*. Estas tarefas devem ser executadas por um especialista em geomensura. Após o levantamento de pontos a campo, os dados brutos armazenados nos equipamentos topográficos devem ser *transferidos* para ambiente virtual de computador. Com o uso de *software* adequado, devem ser *elaborados os perfis topográficos* a partir dos pontos coletados em cada seção. De modo a facilitar a análise posterior das erosões, recomenda-se que os perfis sucessivos do mesmo local sejam plotados num único gráfico. Na posse dos perfis de todos os locais monitorados, estes podem ser agrupados e *exportados* em arquivo editável (.dwg) para análise posterior das erosões. Além disso, é aconselhado o fornecimento dos dados de localização (X, Y, Z) dos pontos topográficos coletados em cada seção em formato .xls. Os pontos coletados podem ainda ser fornecidos em formato compatível para visualização em sistema de informações geográficas, a depender da exigência do contratante ou do órgão fiscalizatório.

**Análise de seções topográficas:** A análise de seções topográficas compreende as tarefas de análise das erosões verificadas no *talude superior*, no *talude inferior*, na *seção topográfica* como um todo, no *trecho/subtrecho* e na emissão de *relatório técnico* dos processos verificados. A avaliação dos processos erosivos identificados pelas seções pode ser realizada de diferentes formas, a depender dos objetivos e/ou necessidades do levantamento. Desta forma, serão apresentadas a seguir apenas algumas alternativas de análise, ficando a critério do técnico responsável o seu uso ou o desenvolvimento de novas análises. O primeiro dado importante a ser obtido é a magnitude e a velocidade de recuo da crista do *talude superior*, a qual tem efeitos diretos sobre a faixa de área de preservação permanente (APP) obrigatória ao longo das margens do reservatório. O recuo da crista ( ) pode ser obtido por medição direta entre seções topográficas sucessivas (Figura 6). A taxa de recuo da crista ( ) pode ser determinada pela Equação 1:

$$i_{rc} = \frac{R_c}{\Delta t} \quad (1)$$

sendo:  $i_{rc}$ , taxa de recuo da crista (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...);  $R_c$ , recuo da crista (cm, m, ...) e  $\Delta t$ , intervalo de tempo (mês, ano, ...).



**Figura 6. Representação esquemática do recuo da crista, da área transversal de solo erodido no talude superior e talude inferior e os respectivos comprimentos de talude**

O recuo médio do talude superior também pode ser analisado considerando a área transversal de solo erodido ( $A_{e\ ts}$ ) e o seu comprimento ( $C_{ts}$ ) (Figura 6). Esta análise pode ser utilizada quando a superfície apresentar muitos pontos de inflexão. Além disso, também se pode obter um valor médio de recuo da margem no comprimento erodido quando ocorrer perda visível de solo somente na base do talude superior, por exemplo. Em algumas porções do talude superior pode ocorrer a deposição de pequenas quantidades de solo ( $A_{d\ ts}$ ) em função das conformações do terreno. No entanto, essa deposição geralmente é desprezível em relação à área transversal de solo removido. Desta forma, o recuo médio do talude superior ( $R_{m\ ts}$ ) pode ser determinado pela Equação 2:

$$R_{m\ ts} = \frac{A_{e\ ts} - A_{d\ ts}}{C_{ts}} \tag{2}$$

sendo:  $R_{m\ ts}$ , recuo médio do talude superior (cm, m, ...);  $A_{e\ ts}$ , área de solo erodido e  $A_{d\ ts}$ , área de solo depositado no talude superior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...) e  $C_{ts}$ , comprimento do talude superior (cm, m, ...). A taxa de recuo médio do talude superior ( $i_{rm\ ts}$ ) pode ser determinada pela Equação 3:

$$i_{rm\ ts} = \frac{R_{m\ ts}}{\Delta t} \tag{3}$$

sendo:  $i_{rm\ ts}$ , taxa de recuo médio do talude superior (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...).

A taxa de recuo da crista e a taxa de recuo do talude superior não são necessariamente coincidentes. Assim como no talude superior, o talude inferior também sofre desestruturação e transporte de solo devido ao efeito das ondas e das oscilações periódicas do nível do reservatório. Além disso, e diferentemente do talude superior, o talude inferior recebe, com frequência, a deposição de sedimentos advindos do talude superior. A partir da área transversal de solo erodido ( $A_{e\ ti}$ ) e depositado ( $A_{d\ ti}$ ) ao longo de determinado comprimento do talude inferior, pode-se determinar o seu recuo/aprofundamento médio ( $R_{m\ ti}$ ) pela Equação 4:

$$R_{m\ ti} = \frac{A_{e\ ti} - A_{d\ ti}}{C_{ti}} \tag{4}$$

sendo:  $R_{m\ ti}$ , recuo médio do talude inferior (cm, m, ...);  $A_{e\ ti}$ , área de solo erodido e  $A_{d\ ti}$ , área de solo depositado no talude inferior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...) e  $C_{ti}$ , comprimento do talude inferior (cm, m, ...). A taxa de recuo médio do talude inferior ( $i_{rm\ ti}$ ) pode ser determinada pela Equação 5:

$$i_{rm\ ti} = \frac{R_{m\ ti}}{\Delta t} \tag{5}$$

sendo:  $i_{rm\ ti}$ , taxa de recuo médio do talude inferior (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...). A soma da resultante de área transversal de solo erodido e depositado no talude superior e no talude inferior, quando considerada em relação ao comprimento unitário longitudinal de margem, retorna o volume de solo erodido ou depositado por seção topográfica ( $V_{e\ s}$ ), conforme definido pela Equação 6:

$$V_{e\ s} = (A_{e\ ts} - A_{d\ ts}) + (A_{e\ ti} - A_{d\ ti}) \tag{6}$$

sendo:  $V_{e\ s}$ , volume de solo erodido na seção topográfica (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, ...). O resultado da equação acima pode ser negativo, embora pouco provável, quando houver mais deposição que erosão. Este aspecto pode ser o caso de pequenas baías ou zonas de deposição de sedimentos. A taxa de volume de solo erodido ( $i_{v\ s}$ ) por comprimento unitário longitudinal de margem pode ser determinada pela Equação 7:

$$i_{v\ s} = \frac{V_{e\ s}}{\Delta t} \tag{7}$$

sendo:  $i_{v\ s}$ , taxa de volume de solo erodido na seção topográfica (cm<sup>3</sup>/mês, cm<sup>3</sup>/ano, m<sup>3</sup>/mês, m<sup>3</sup>/ano, ...). Com base na Equação 6 pode-se estimar o peso de solo erodido ( $P_{e\ s}$ ) por comprimento unitário de margem, conforme definido pela Equação 8:

$$P_{e\ s} = V_{e\ s} \cdot \rho_s \tag{8}$$

sendo:  $P_{e\ s}$ , peso de solo erodido na seção topográfica (kg, ton) e  $\rho_s$ , densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>, ton/m<sup>3</sup>). A taxa de peso de solo erodido ( $i_{p\ s}$ ) pode ser determinada pela Equação 9:

$$i_{p\ s} = \frac{P_{e\ s}}{\Delta t} \tag{9}$$

sendo:  $i_{p\ s}$ , taxa de peso de solo erodido na seção topográfica (kg/mês, ton/mês, kg/ano, ton/ano,...). Com base na Equação 6 pode-

se estimar o volume de solo erodido ao longo do trecho ou subtrecho ( $V_{e\ t}$ ) representativo abrangido por cada seção topográfica através da Equação 10:

$$V_{e\ t} = ((A_{e\ ts} - A_{d\ ts}) + (A_{e\ ti} - A_{d\ ti})) \cdot C_m \tag{10}$$

sendo:  $V_{e\ t}$ , volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>) e  $C_m$ , comprimento do trecho ou subtrecho (m). A taxa de volume de solo erodido no trecho ou subtrecho ( $i_{v\ t}$ ) pode ser determinada pela Equação 11:

$$i_{v\ t} = \frac{V_{e\ t}}{\Delta t} \tag{11}$$

sendo:  $i_{v\ t}$ , taxa de volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>/mês, m<sup>3</sup>/ano, ...). Com base na Equação 10 pode-se estimar o peso de solo erodido ( $P_{e\ t}$ ) no trecho ou subtrecho pela Equação 12:

$$P_{e\ t} = V_{e\ t} \cdot \rho_s \tag{12}$$

sendo:  $P_{e\ t}$ , peso de solo erodido no trecho ou subtrecho (kg, ton). A taxa de peso de solo erodido por trecho ou subtrecho ( $i_{p\ t}$ ) pode ser determinada pela Equação 13:

$$i_{p\ t} = \frac{P_{e\ t}}{\Delta t} \tag{13}$$

sendo:  $i_{p\ t}$ , taxa de peso de solo erodido no trecho ou subtrecho (kg/mês, ton/mês, kg/ano, ton/ano, ...). As análises das erosões realizadas a partir dos perfis topográficos podem ser compiladas em um relatório técnico para compartilhamento com o contratante e/ou órgão fiscalizador. A estrutura e organização do documento ficam a cargo do profissional responsável pelo seu desenvolvimento. Recomenda-se classificar os pontos monitorados em ordem de problemática, de modo que a empresa responsável pelo reservatório possa planejar e executar medidas de controle dos processos erosivos nos pontos mais problemáticos. Neste sentido cabe salientar que o controle e mitigação deste tipo de processos erosivos pode ser realizado por meio de projetos de Engenharia Natural, o que vem sendo implementado com sucesso recentemente em reservatórios no Brasil. **Error! Reference source not found.** apresenta ofluxograma completo com as três etapas e respectivas atividades e tarefas, de forma cronológica e sequencial.

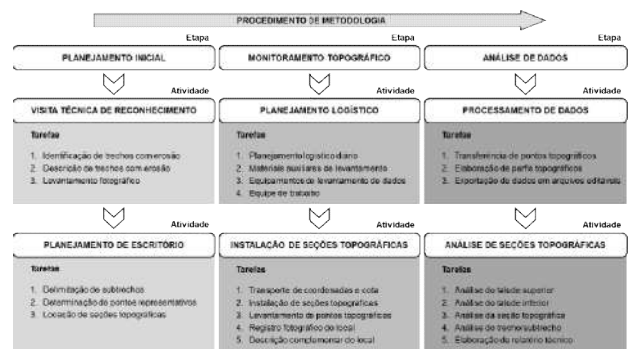


Figura 7. Fluxograma geral da metodologia de monitoramento proposta

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A existência de erosões em margens de reservatórios é amplamente reconhecida por órgãos fiscalizatórios e pelos responsáveis técnicos dos empreendimentos. No entanto, a lacuna metodológica existente até o momento desfavorecia o acompanhamento e quantificação do fenômeno em larga escala. A metodologia proposta é de fácil aplicação e adequa-se a reservatórios com diferentes dimensões, cuja característica é favorável à sua replicação. A metodologia pode ser implementada em caráter temporário ou permanente, a depender dos objetivos que se pretendem atingir com o monitoramento das erosões.



Esta metodologia também pode ser utilizada para auxiliar na tomada de decisão de quais os trechos de margem prioritários para o controle dos processos erosivos. Os levantamentos topográficos sucessivos de um determinado local monitorado possibilitam a identificação dos segmentos do terreno mais afetados pela erosão e, desta forma, podem servir de base para a escolha, dimensionamento e locação de técnicas de intervenção. Desta forma, a análise e o controle de erosões em reservatórios podem ser baseados em critérios mais objetivos, técnicos e analíticos. Quanto ao quantitativo de campanhas de monitoramento, cabe salientar a importância de monitoramentos de longo prazo, com pelo menos cinco anos de acompanhamento, de modo que a predição da evolução das erosões possa ser calculada de forma mais assertiva. Diante do exposto, o monitoramento quantitativo é essencial para que os processos erosivos atuantes possam ser melhor previstos e mitigados. Esta abordagem contribui para uma melhor compreensão do efeito da dinâmica lacustre sobre a perda de solo em diferentes locais e reservatórios, o que até o presente momento ainda é pouco elucidado.

#### Agradecimentos

Os Autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e à Engie Brasil Energia pelo apoio recebido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL 2008. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica.
- BARTLEY, R. et al. 2006. *Measuring rates of bank erosion and channel change in northern Australia: a case study from the Daintree River catchment*. Clayton South: CSIRO.
- BORGES, C. Z. 2004 *Erosão marginal no rio Paraná após a conclusão do reservatório da UHE Sérgio Motta Porto Primavera a jusante da barragem*. Dissertação de mestrado—Maringá: Universidade Estadual de Maringá.
- CASADO, A. P. B. et al. 2002. *Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco Perímetro Irrigado Cotinguiba/Pindoba - SE*. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, n. 1, p. 231–239.
- CORREA, G. T.; FILHO, E. E. DE S. 2009. *Avaliação dos processos de erosão marginal no Arquipélago Floresta Japonesa Alto Rio Paraná*. Geografia Londrina, v. 18, n. 2, p. 1–20.
- COUPER, P.; STOTT, T.; MADDOCK, I. 2002 *Insights into river bank erosion processes derived from analysis of negative erosion-pin recordings: observations from three recent UK studies*. Earth Surface Processes and Landforms, v. 27, n. 1, p. 59–79.
- CURRAN, J. H. 2001. *Baseline channel morphology and bank erosion inventory of South Fork Campbell Creek at Campbell Tract, Anchorage, Alaska, 1999 and 2000*. Anchorage: United States Department of the Interior - Geological Survey.
- DEWES, J. J. 2019. *Metodologia para monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas*. Dissertação Mestrado - Programa de pós-graduação em Engenharia Florestal - Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria UFSM.
- ELLIOTT, M. C. 1991. *Erosion of fractured banks, Lake Sakakawea, Western North Dakota*. Dissertação de mestrado—Grand Forks, North Dakota: University of North Dakota.
- FERNANDEZ, O. V. Q. 1996. *O método dos pinos na quantificação da erosão marginal em rios e reservatórios*. Sociedade & Natureza, v. 1, n. 15, p. 160–163.
- FORMIGA, K. T. M.; VASCO, J. R. G.; PEREIRA, T. S. R. 2017. *Monitoramento e modelagem de ondas em reservatório*. In: SALES, M. M. et al. *Erosão em borda de reservatório*. Goiânia: Gráfica UFG, v. 3, p. 584.
- GATTO, L. W. 1988 *Techniques for Measuring Reservoir Bank Erosion*. Hanover, New Hampshire: US Army Corps of Engineers.
- HAIGH, M. 1977 *The use of erosion pins in the study of slope evolution*. Chicago, Illinois: Department of geography, University of Chicago.
- HUDSON, H. R. 1982. *A field technique to directly measure river bank erosion*. Canadian Journal of Earth Sciences, v. 19, n. 2, p. 381–383.
- JUSTINIANO, L. A. DE A.; SOUZA, C. A. DE; PIERANGELI, M. A. P. 2013. *Migração lateral do rio Paraguai entre a foz do rio Sepotuba e a foz do rio Cabaçal - Mato Grosso*. Revista GeoPantanal, v. 8, n. 14, p. 106–128.
- LAWLER, D. M. 1993b. *Needle ice processes and sediment mobilization on river banks: the River Ilston, West Glamorgan, UK*. Journal of Hydrology, v. 150, n. 1, p. 81–114.
- NASCIMENTO, D. T. F. et al. 2017 *Mapeamento de cobertura do solo em bordas de reservatório e processos erosivos associados*. In: SALES, M. M. et al. *Erosão em borda de reservatório*. Goiânia: Gráfica UFG, v. 3, p. 584.
- NRCS 2014. *A guide for design and layout of vegetated wave protection for earthen embankments and shorelines*. Washington: United States Department of Agriculture.
- PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M.; MAL, B. C. 2007. *Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing*. Water Resources Management, v. 21, n. 4, p. 729–746.
- REID, J. R. 1984. *Shoreline erosion processes: Orwell Lake, Minnesota*. Hanover, New Hampshire: United States Army Corps of Engineers - Cold Regions Research & Engineering Laboratory.
- ROCHA, H. J. DA; PASE, H. L. 2015 *O conflito social e político nas hidrelétricas da bacia do Uruguai*. Revista Brasileira de Ciências Sociais, v. 30, n. 88, p. 99–113.
- RUBIO, M. F. 2014. *Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa & Desenvolvimento no estudo de casos nas UHEs Chavantes e Rosana rio Paranapanema, SP/PR*. Tese Doutorado - Programa de pós-graduação em Geografia Física—São Paulo: Universidade de São Paulo.
- SILVA, A. et al. 2007. *Avaliação da erosão na margem direita do rio Paraguai a jusante da praia do Julião município de Cáceres-MT*. Revista Geográfica Acadêmica, v. 1, n. 1, p. 5–19.
- SOUZA, C. A. DE; CUNHA, S. B. 2007. *Pantanal de Cáceres - MT: dinâmica das margens do rio Paraguai entre a cidade de Cáceres e a estação ecológica da ilha de Taiamã -MT*. Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros - Seção Três Lagoas, v. 1, n. 5, p. 18–42.
- TANG, Q. et al. 2014. *Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China*. Science of the Total Environment, n. 479-480, p. 258-266.
- THORNE, C. R. 1981. *Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength*. Proceedings of the Florence Symposium. Anais... In: EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENT, Florence.
- TOLMASQUIM, M. T. ed. 2005 *Geração de energia elétrica no Brasil*. 1. ed. Engenho Novo, Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- TOMMASELLI, A. M. G. et al. 2014. *Monitoring marginal erosion in hydroelectric reservoirs with terrestrial mobile Laser scanner*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Anais... In: ISPRS TECHNICAL COMMISSION V SYMPOSIUM. Riva del Garda, Italy.

\*\*\*\*\*