

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**Junior Joel Dewes**

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

Santa Maria, RS  
2019



**Junior Joel Dewes**

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

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili

Santa Maria, RS  
2019

Esse trabalho contou com aporte de recursos financeiros oriundos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) e da Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (**FATEC**).

Dewes, Junior Joel

Metodologia para monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas / Junior Joel Dewes.- 2019.

160 p.; 30 cm

Orientador: Fabrício Jaques Sutili

Coorientador: Frederico Dimas Fleig

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2019

1. Engenharia Natural 2. Recuperação de Áreas Degradadas 3. Seções Topográficas 4. Dinâmica Lacustre 5. Manejo de Bacias Hidrográficas I. Sutili, Fabrício Jaques II. Fleig, Frederico Dimas III. Título.

Junior Joel Dewes

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

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

**Aprovado em 19 de fevereiro de 2019:**



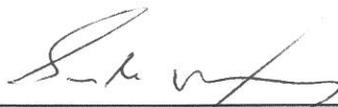
---

**Fabrício Jaques Sutfi, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)**



---

**Sandro Vaccaro, Dr. (CERAN)**

Santa Maria, RS  
2019



## DEDICATÓRIA

*Ao meu irmão Juliano Joel, à minha irmã Daila Carine,  
à minha mãe Marcia Inês e ao meu pai Renato Luis*



## **AGRADECIMENTOS**

*A escrita desta dissertação foi uma tarefa árdua e solitária, mas a sua concretização está alicerçada no empenho e dedicação de um conjunto de pessoas e instituições, dentre as quais eu gostaria de destacar:*

*- o Prof. Dr. Fabrício J. SUTILI pela oportunidade concedida e pela confiança depositada em meu trabalho. Agradeço também imensamente pelos conhecimentos transmitidos, os quais, de agora em diante, estarão comigo em todos os momentos;*

*- a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) pelo ótimo ambiente de estudo e de trabalho proporcionados;*

*- os meus colegas de laboratório, em especial à Rita S. SOUSA que esteve diretamente envolvida, desde o início, nas atividades desenvolvidas neste estudo. Agradeço também a ela pela leitura e sugestões para melhorar a parte escrita deste trabalho;*

*- a Real Topografia Ltda, em especial o Alsir KLEIN, a Alice FERNANDES, o Diogo KLEIN, o Cleiton RAMBO e o Maicon CAMAROTTO pelo excelente trabalho de topografia executado com competência e profissionalismo. Agradeço imensamente pelo empenho e dedicação de cada um de vocês. Meu muito obrigado!!!;*

*- a Engie Brasil Energia, em especial ao Engenheiro Cid IONCECK que esteve envolvido diretamente no desenvolvimento e aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Agradeço pelo ótimo ambiente de trabalho e pelas conversas produtivas que tivemos;*

*- a minha família, colegas e amigos pela compreensão e pelas palavras de apoio em todos os momentos ao longo destes dois anos de trabalho;*

*- a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos e a Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) pela gestão de recursos financeiros oriundos de convênio firmado entre a UFSM e a Engie Brasil Energia;*

*Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta trajetória e que contribuíram, direta ou indiretamente, para a concretização deste estudo.*



*A profissão de Engenheiro Florestal  
é metade conhecimento e metade  
arte, somente a prática faz o mestre.*

*(Johann Heinrich Cotta)*



## RESUMO

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

AUTOR: Junior Joel Dewes  
ORIENTADOR: Fabrício Jaques Sutili

O Brasil tem vivenciado, nas últimas décadas, uma crescente demanda da população e dos setores da economia por água e energia. Esta constatação, associada à abundância natural de recursos hídricos com potencial para aproveitamento hidráulico tem intensificado a implantação de novos empreendimentos hidrelétricos em todo o país. Estes empreendimentos, por sua vez, geram alterações no ambiente em que estão inseridos, os quais podem variar em função do seu porte. Um dos impactos gerados é o surgimento de processos erosivos nas margens do reservatório devido principalmente à ação das ondas sobre as encostas circundantes e a oscilação do nível de operação do reservatório. Com base na literatura técnica disponível verificou-se que o monitoramento de perdas de solo em margens de reservatórios poucas vezes é realizado e os métodos de medição disponíveis são inapropriados para estudos neste tipo de ambiente. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para o monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas (UHE's), considerando a sua dinâmica lacustre. 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 alvo de estudo. As informações coletadas são posteriormente analisadas durante o planejamento de escritório. A segunda etapa consiste no planejamento logístico prévio, seguido das atividades de instalação de seções topográficas a campo relativas ao 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 (análise de seções topográficas) em escritório. A metodologia prevê a execução de campanhas sucessivas de monitoramento no mesmo local, de modo que a perda de solo observada entre perfis topográficos sucessivos possa ser determinada. A aplicação prática da metodologia ocorreu no reservatório da UHE Itá, localizada no rio Uruguai, no sul do Brasil. As duas primeiras campanhas de monitoramento foram executadas em janeiro e dezembro de 2018. Para a validação prática da metodologia foram considerados apenas quatro locais. Após 11 meses da primeira campanha de monitoramento, verificou-se uma perda mínima e máxima de 0,111 m<sup>3</sup> (S139) e 0,526 m<sup>3</sup> (S141) de solo por metro linear de margem, respectivamente. A partir do volume de solo erodido nos quatro locais foi estimada a erosão de 70,457 m<sup>3</sup> de solo ao longo de 205 metros de margem monitorados. Desta forma, a metodologia de monitoramento proposta apresenta sensibilidade para detectar perdas de solo entre perfis topográficos resultantes de campanhas sucessivas e mostra-se adequada para o monitoramento de margens de grandes reservatórios de água.

**Palavras-chave:** Engenharia Natural. Recuperação de Áreas Degradadas. Seções Topográficas. Dinâmica Lacustre. Manejo de Bacias Hidrográficas.



## ABSTRACT

### METHODOLOGY FOR MONITORING OF EROSION PROCESSES IN BANKS OF HYDROPOWER PLANTS RESERVOIRS

AUTHOR: Junior Joel Dewes  
ADVISOR: Fabrício Jaques Sutili

Brazil has experienced in recent decades, an increasing demand of the population and industries by water and energy. This finding combined with the natural abundance of water resources with potential for hydraulic exploitation has intensified the implementation of hydropower plants across the country. However, the implantation of hydropower plants, regardless their size, generates environment changes. One of the impacts generated is the emergence of erosion processes on the reservoir banks due to wave action on the surrounding slopes and to water level oscillation due to hydropower plant operation. Based on available technical literature, it was found that soil losses monitoring in reservoirs banks is rarely carried out and the measurement methods available are unsuitable for studies in this kind of environment. In this sense, the aim of this work is to propose an appropriate methodology for monitoring erosion processes in banks of reservoirs of hydroelectric plants, considering the lake dynamics. The proposed methodology consists of three stages, including initial planning, topographic monitoring and data analysis. In the first step is conducted a technical survey of recognition of the reservoir to be studied. The information collected is then analysed during the office planning. The second step consists in logistics planning, followed by the activities of field installation of topographical sections related to the monitoring of the stretches with erosion. In this activity are used topographical equipment (RTK System and/or total station) for collecting topographical points on the target site. The third step consists in processing topographic data obtained in the previous step and in the analysis of the resulting topographic profiles (topographical sections analysis) in the office. The methodology foresees the implementation of successive monitoring campaigns in the same location, so that the soil loss observed between successive topographic profiles can be measured. The practical application of the methodology occurred in the reservoir of Itá Hydroelectric Power Plant, located on the Uruguay River, southern Brazil. The first two monitoring campaigns were performed in January and December 2018. For the practical validation of the methodology were considered only four locations. After 11 months of first monitoring campaign, was found minimum and maximum loss of 0.111 m<sup>3</sup> (S139) and 0.526 m<sup>3</sup> (S141) of soil per linear metre of shoreline, respectively. The amount of eroded soil in all four sites was estimated in 70.457 m<sup>3</sup> over 205 meters of monitored bank. Therefore, the proposed monitoring methodology presents sensitivity to detect soil losses between topographic profiles resulting from successive campaigns and is suitable for monitoring banks of large water reservoirs.

**Keywords:** Soil Bioengineering. Reclamation of Degraded Areas. Topographical Profiles. Lake Dynamics. Watershed Management.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Potencial hidrelétrico brasileiro total e por bacia hidrográfica. ....	27
Figura 2 – Aproveitamento, inventário e estimativa do potencial hidrelétrico por bacia hidrográfica.....	28
Figura 3 – Representação esquemática da mudança do nível do lençol freático devido à formação de um reservatório pelo barramento de um rio. ....	30
Figura 4 – Representação esquemática da conformação inicial do terreno e conformação definitiva resultante da influência do reservatório. ....	33
Figura 5 – Nomenclatura utilizada na descrição de ondas.....	35
Figura 6 – Representação esquemática de um reservatório para determinação do <i>fetch</i> . ....	36
Figura 7 – Relação entre a velocidade do vento sobre a superfície terrestre ( $VT$ ) e sobre a superfície do reservatório ( $VS$ ) para diferentes comprimentos de <i>fetch</i> .....	38
Figura 8 – Diferentes tipos de rebentação de ondas resultantes da conformação da plataforma de abrasão. ....	40
Figura 9 – Movimento orbital da água considerando diferentes profundidades da água. ....	41
Figura 10 – Representação esquemática de movimentação de sedimentos embaixo de uma onda. O material grosseiro presente no fundo do leito salta para a posição B. Uma grande percentagem de material seguem trajetórias variadas, desde movimentos horizontais a trajetórias elípticas achatadas durante o colapso de cada onda. O material fino viaja suspenso na posição A. O material em frente (C) e atrás (D) da zona de rebentação move-se em direção à onda. O diâmetro do material em cada posição é função da energia da onda.....	42
Figura 11 – Comparação entre <i>fetch</i> efetivo e profundidade de movimentação de sedimentos em função de diferentes velocidades de vento. Os dados de erosão, transporte e acumulação de sedimentos de 0,1 mm de diâmetro a uma dada profundidade presentes no box hachurado foram observados no lago Vänern por Hakanson (1977).....	42
Figura 12 – Influência da forma da baía e configuração da margem sobre a convergência e divergência de ondas. ....	43
Figura 13 – Tipos de deslizamentos que ocorrem em taludes de reservatórios. (A) escorregamento translacional e (B) escorregamento rotacional. ....	46

Figura 14 – Aumento da estabilidade do talude em razão da alteração da sua geometria.....	47
Figura 15 – Tombamento de solo. (A) material grosseiro e (B) material fino.....	48
Figura 16 – Representação esquemática de erosão tipo <i>piping</i> em camada arenosa favorecida pelo corte da encosta para extração de minérios (a) e execução de uma estrada (b). (1) folhelhos; (2) areia fina; (3) marga (tipo de calcário argiloso); (4) corte de uma rodovia e (5) depósito de areias.....	50
Figura 17 – Representação esquemática da margem do reservatório com delimitação das faixas do terreno a serem intervencionadas. ....	51
Figura 18 – Representação esquemática com divisão da margem em faixas de intervenção definidas com base no regime de inundação. ....	52
Figura 19 – Representação esquemática do posicionamento de pinos de erosão na face vertical de um talude para acompanhamento do recuo da margem. ....	54
Figura 20 – Representação esquemática do método PEEP ( <i>Photo-Electronic Erosion Pin</i> ) instalado próximo a uma margem fluvial para medição da erosão por meio de sensores fotovoltaicos. ....	59
Figura 21 – Representação esquemática do posicionamento de estacas de madeira no topo do talude para acompanhamento do recuo da margem. ....	61
Figura 22 – Representação esquemática do método das perfilagens sucessivas em um talude.....	63
Figura 23 – Perfilagens da face do talude obtidas a partir de duas medições sucessivas. (A) margem 1 e (B) margem 2.....	63
Figura 24 – Divisão de trechos com erosão em subtrechos em função de características fisionômicas distintas.....	71
Figura 25 – Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de planejamento inicial do monitoramento de processos erosivos. ....	73
Figura 26 – Lançamento de barco náutico em um ponto de acesso ao reservatório. ....	75
Figura 27 – Rede de Vértices Geodésicos (RVG). (A) vista parcial de um marco da RVG posicionado nas margens de um reservatório com devida identificação e (B) transporte de coordenadas geográficas e cota altimétrica a partir de um marco de RVG para trabalhos de nivelamento e topografia em geral. ....	76
Figura 28 – Materiais auxiliares necessários para o levantamento de dados a campo. (A) barco náutico motorizado com coletes salva-vidas; (B) estacas de madeira para	

identificação das seções topográficas; (C) piquete de madeira com marcação no topo para transporte de coordenadas e cota (posicionado ao lado da estaca em madeira) e (D) ferramentas auxiliares de limpeza da faixa de coleta de dados no terreno natural. ....	78
Figura 29 – Representação esquemática do mecanismo de operação do sistema RTK ( <i>Real Time Kinematic</i> ) de levantamento topográfico. ....	81
Figura 30 – Procedimento de instalação da estação base e configuração da estação móvel. (A) posicionamento do tripé e nivelamento de sua base; (B) posicionamento e nivelamento do receptor de sinal GPS sobre o marco da RVG; (C) medição de altura do receptor em relação ao topo da chapa metálica do marco da RVG e (D) configuração da estação móvel ( <i>rover</i> ) a partir das coordenadas geográficas fornecidas pela estação base e cota conhecida do marco da RVG. ....	82
Figura 31 – Procedimento de instalação de seções topográficas. (A) cravação de piquete e estaca de madeira para materialização e identificação da seção topográfica, respectivamente e (B) aspecto geral após cravação definitiva do piquete e estaca em madeira. ....	84
Figura 32 – Nomenclatura adotada para os diferentes segmentos do terreno que compõem as margens de reservatórios de água. ....	85
Figura 33 – (A) representação esquemática do alinhamento ortogonal da seção topográfica em relação às curvas de nível do terreno e à cota máxima do reservatório e (B) representação esquemática da seção topográfica no terreno natural, talude superior e talude inferior. ....	86
Figura 34 – (A) transporte de coordenadas geográficas (X, Y) e cota altimétrica (Z) com sistema RTK até o local de implantação da seção topográfica (a estação móvel está posicionada sobre o piquete) e (B) coleta de primeiro ponto topográfico no terreno natural para determinação do alinhamento ortogonal da seção em relação às curvas de nível do terreno e à cota máxima do reservatório. ....	87
Figura 35 – Procedimento de instalação de estação total. (A) posicionamento e nivelamento do tripé; (B) pré-posicionamento da estação total; (C) nivelamento e posicionamento da estação total sobre o tripé e o piquete, respectivamente e (D) coleta de pontos sobre o alinhamento da seção topográfica. ....	87
Figura 36 – Representação esquemática do procedimento de coleta de pontos sobre o alinhamento da seção topográfica. ....	88

Figura 37 – Detalhes do procedimento de coleta de pontos. (A) utilização do sistema RTK e estação total; (B) coleta de pontos com sistema RTK no terreno natural; (C) detalhe do levantamento da crista do talude; (D) detalhe do levantamento da base do talude; (E) detalhe do levantamento de pontos de inflexão e (F) coleta de pontos sobre o solo nos espaços formados entre os blocos de rocha. ....	91
Figura 38 - Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de monitoramento topográfico do monitoramento de processos erosivos. ....	94
Figura 39 – Representação esquemática de perfis topográficos obtidos a partir de campanhas sucessivas de monitoramento do mesmo local. ....	96
Figura 40 – Representação esquemática para medição do recuo da crista ( $R_c$ ) do talude superior. ....	98
Figura 41 – Representação esquemática para medição da área de solo erodido ( $A_{e ts}$ ) no talude superior. ....	99
Figura 42 – Representação esquemática para medição da área de solo erodido no talude inferior. ....	101
Figura 43 - Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de análise de dados do monitoramento de processos erosivos. ....	106
Figura 44 – Fluxograma geral da metodologia de monitoramento proposta. ....	107
Figura 45 – Localização da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá) na região sul do Brasil. ....	110
Figura 46 – Localização e bacia de contribuição da Usina Hidrelétrica de Itá UHE Itá. ....	111
Figura 47 – Perfil longitudinal do rio Uruguai e localização da UHE Itá. ....	112
Figura 48 – Perímetro do reservatório (azul) e área diretamente afetada (preto)...	113
Figura 49 –Diferentes tipos de margens encontradas no perímetro do reservatório da UHE Itá. ....	116
Figura 50 – Imagem orbital com alguns trechos identificados com erosão na margem direita (cor laranja) e margem esquerda (cor verde) no reservatório da UHE Itá. ..	119
Figura 51 – Localização dos portos, marcos da RVG e trechos com erosão alvos de monitoramento no reservatório da UHE Itá. ....	123
Figura 52 – Equipamentos utilizados durante o levantamento topográfico a campo. ....	124
Figura 53 – Pontos coletados sobre as seções topográficas dos trechos ME-06 (S104 e S105) e ME-05 (S106 a S112) localizados na margem esquerda. ....	128

Figura 54 – Vista geral do trecho MD-01 contendo as seções topográficas utilizadas para avaliação de processos erosivos e validação da metodologia. ....	130
Figura 55 – Fisionomia geral dos subtrechos de abrangência das quatro seções topográficas (S139 a S142) escolhidas para a análise dos processos erosivos após duas campanhas de monitoramento. ....	131
Figura 56 – Perfis topográficos do terreno (sem escala) das quatro seções topográficas monitoradas. ....	132
Figura 57 – Perfis topográficos da seção topográfica S139 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento. ....	151
Figura 58 - Perfis topográficos da seção topográfica S140 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento. ....	152
Figura 59 - Perfis topográficos da seção topográfica S141 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento. ....	153
Figura 60 - Perfis topográficos da seção topográfica S142 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento. ....	154



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização geográfica dos portos utilizados durante o monitoramento para acesso do barco ao reservatório. ....	122
Tabela 2 – Localização geográfica das seções topográficas escolhidas na validação da metodologia. ....	131
Tabela 3 – Análise do processo erosivo verificado nos taludes superiores das quatro seções topográficas consideradas. ....	133
Tabela 4 - Análise do processo erosivo verificado nos taludes inferiores das quatro seções topográficas consideradas. ....	135
Tabela 5 - Análise do processo erosivo verificado por comprimento unitário de margem para as quatro seções topográficas consideradas. ....	137
Tabela 6 – Estimativa de perda de solo verificada por subtrecho monitorado por cada seção topográfica. ....	138
Tabela 7 – Modelo de planilha para exportação dos dados relativos aos pontos topográficos coletados sobre cada seção topográfica. ....	157
Tabela 8 – Coordenadas UTM (SIRGAS 2000; Fuso 22) dos pontos de início (jusante) e final (montante) de cada trecho cadastrado com erosão (MD: margem direita; ME: margem esquerda), bem como o comprimento de margem (m) e o número de seções topográficas instaladas em cada trecho. ....	158

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Espaçamento vertical (V) e horizontal (H) adotado entre pinos de erosão e comprimento do trecho monitorado em algumas pesquisas realizadas. ....	55
Quadro 2 – Tipo de material frequentemente utilizado na confecção dos pinos de erosão e respectivas dimensões (diâmetro e comprimento) adotadas em alguns estudos. ....	57
Quadro 3 – Etapas básicas e respectivas atividades a serem realizadas durante o processo de monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de água. ....	67



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 OBJETIVOS .....	26
1.1.1 Objetivo geral.....	26
1.1.2 Objetivos específicos.....	26
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
2.1 POTENCIAL HIDRELÉTRICO E RESERVATÓRIOS NO BRASIL .....	27
2.2 RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS.....	29
2.2.1 Enchimento e operação de reservatórios de água.....	29
2.2.2 Erosões em reservatórios de água.....	31
2.2.3 Efeito das ondas em reservatórios .....	32
2.2.4 Fatores limitantes da resistência mecânica dos taludes.....	44
2.2.5 Movimentos de massa .....	46
2.2.6 <i>Piping</i> .....	49
2.2.7 Mitigação de processos erosivos em margens de reservatórios .....	50
2.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DIRETO DE EROSÕES .....	52
2.3.1 Método dos pinos.....	53
2.3.2 Método das estacas .....	60
2.3.3 Método das perfilagens sucessivas .....	62
<b>3 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE EROSÕES EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS .....</b>	<b>65</b>
3.1 LIMITAÇÕES TÉCNICAS DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO .....	65
3.2 PROPOSTA DE METODOLOGIA DE MONITORAMENTO DIRETO A CAMPO.....	67
3.2.1 Planejamento inicial.....	67
3.2.1.1 <i>Visita técnica de reconhecimento</i> .....	68
3.2.1.2 <i>Planejamento de escritório</i> .....	70
3.2.2 Monitoramento topográfico.....	73

3.2.2.1 Planejamento logístico.....	74
3.2.2.2 Instalação de seções topográficas.....	80
<b>3.2.3 Análise de dados .....</b>	<b>94</b>
3.2.3.1 Processamento de dados .....	94
3.2.3.2 Análise de seções topográficas .....	97
<b>3.2.4 Fluxograma geral .....</b>	<b>106</b>
<b>4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA .....</b>	<b>109</b>
4.1 LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE IMPLANTAÇÃO DA METODOLOGIA .....	109
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DA UHE ITÁ.....	112
4.3 VALIDAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA PROPOSTA .....	117
<b>4.3.1 Planejamento inicial – Visita técnica de reconhecimento .....</b>	<b>117</b>
<b>4.3.2 Planejamento inicial – Planejamento de escritório.....</b>	<b>119</b>
<b>4.3.3 Monitoramento topográfico – Planejamento logístico .....</b>	<b>121</b>
<b>4.3.4 Monitoramento topográfico – Instalação de seções topográficas .....</b>	<b>125</b>
<b>4.3.5 Análise de dados – Processamento de dados .....</b>	<b>126</b>
<b>4.3.6 Análise de dados – Análise de seções topográficas .....</b>	<b>129</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>139</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>143</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>155</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil detém um dos maiores potenciais hídricos tecnicamente aproveitáveis do mundo para produção de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2005). Esta abundância de recursos hídricos, associada a uma demanda crescente por água e energia, vem intensificando a elaboração e execução de projetos de empreendimentos hidrelétricos nas últimas décadas no país (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). As expectativas futuras para este cenário são de crescimento continuado e expansão do setor (ROCHA; PASE, 2015).

A implantação de empreendimentos hidrelétricos, independentemente de seu porte, gera alterações no ambiente em que estão inseridos. Uma das mudanças verificadas é a alteração da dinâmica hidráulica do local decorrente do barramento do rio original para formação do reservatório de água (HACKER; JOHANNSEN, 2012). O enchimento do reservatório e a sua operação favorece o surgimento de processos erosivos principalmente junto às margens, cuja intensidade é específica para cada local e condição.

Os agentes erosivos que influenciam a perda de solo nestes locais são predominantemente as ondas formadas pelo fluxo do vento na superfície do espelho de água (NASCIMENTO et al., 2017; NRCS, 2014) e a oscilação do nível de operação do reservatório (REID, 1992). No entanto, outras variáveis como o tipo e a resistência mecânica do solo (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017), a cobertura vegetal das margens (BAO et al., 2018), a inclinação (GOOD, 1992) e altura dos taludes (THORNE; TOVEY, 1981), entre outros, podem influenciar as taxas de erosão observadas em cada local.

O monitoramento deste tipo de erosão vindo sendo conduzido há décadas em países do hemisfério norte, como nos Estados Unidos e Canadá (GOOD, 1992; LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992; REID, 1992). No entanto, apesar da erosão em bordas de reservatórios ser um fenômeno recorrente, o seu monitoramento ainda é pouco realizado em âmbito brasileiro (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; SIQUEIRA et al., 2015).

Os métodos de monitoramento disponíveis e utilizados em ambientes lacustres são o método dos pinos, o método das estacas e o método das perfilagens sucessivas (ELLIOTT, 1991; FERNANDEZ; FULFARO, 2000; 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. O método adotado para o monitoramento deste tipo de ambiente deve considerar aspectos importantes como a dimensão do reservatório, a ausência de manutenção, a facilidade na coleta e processamento dos dados, o deslocamento via lacustre, a logística (TOMMASELLI et al., 2014), as condições fisionômicas e geotécnicas das margens, a quantidade de materiais e de mão de obra necessários e os recursos financeiros disponíveis.

Diante da ausência de um método de monitoramento adequado, combinado à demanda prática de estudo de perdas de solo em um reservatório de uma usina hidrelétrica localizada no sul do Brasil e do cenário nacional atual e futuro do setor hidrelétrico, este trabalho pretende trazer respostas no sentido de viabilização do monitoramento de erosões em grande escala em margens de reservatórios. Desta forma pretende-se propor uma metodologia de medição direta a campo que integre os princípios de aplicação dos três métodos acima citados, mas que apresente maior versatilidade. Ao mesmo tempo, pretende-se destacar a importância da necessidade de monitoramento deste tipo de ambiente em contexto brasileiro, tendo em conta os empreendimentos hidrelétricos já implantados e por implantar.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para o monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas, considerando a sua dinâmica lacustre.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver as etapas inerentes à metodologia de monitoramento proposta;
- Aplicar a metodologia em um reservatório de uma usina hidrelétrica localizada no sul do Brasil;
- Validar a metodologia através da análise quantitativa dos processos erosivos observados nos locais monitorados.

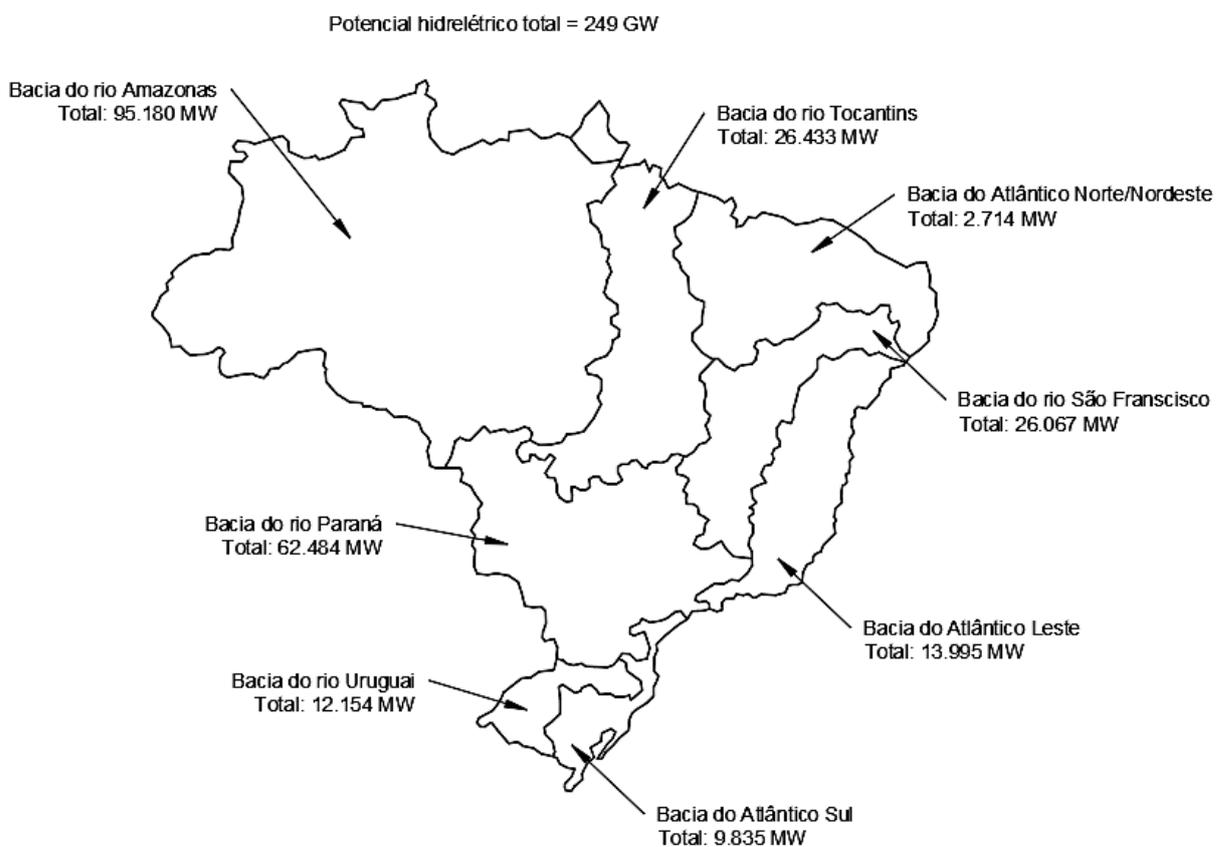
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 POTENCIAL HIDRELÉTRICO E RESERVATÓRIOS NO BRASIL

O Brasil ocupa posição de destaque como um dos maiores detentores de recursos hídricos a nível mundial. O país situa-se em terceiro lugar com 10% do potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável do mundo, permanecendo atrás apenas da China (13%) e da Rússia (12%) (TOLMASQUIM, 2005). Este potencial hidrelétrico equivale a aproximadamente 260.000 Megawatts (MW) (segundo o Plano 2015 da Eletrobrás baseado no inventário de 1992), sendo que 65% deste total encontram-se nas bacias Amazônica (42%) e do Paraná (23%) (ANEEL, 2008).

A Figura 1 apresenta a distribuição do potencial hidrelétrico nas diferentes bacias hidrográficas brasileiras.

Figura 1 – Potencial hidrelétrico brasileiro total e por bacia hidrográfica.

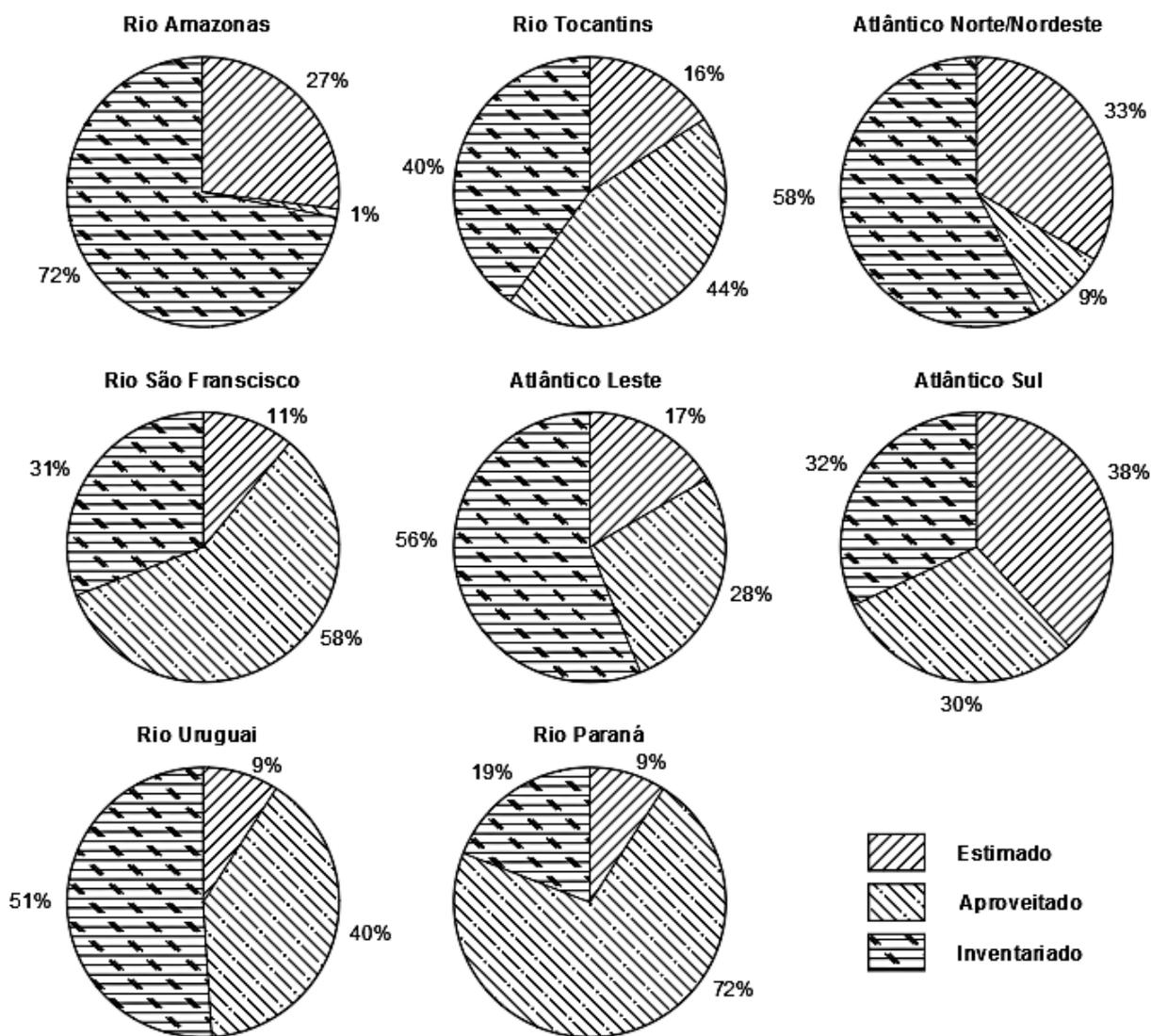


Fonte: (PEREIRA, 2015).

Em 2014, a capacidade de aproveitamento hidráulico instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) era de aproximadamente 90.000 MW, o que representa um aproveitamento de aproximadamente 34% do potencial total (ANEEL, 2008). A projeção para o ano de 2024 é que este montante seja de 115.000 MW, o que representaria o aproveitamento de 44% do potencial energético do país (TOLMASQUIM, 2016). Para o ano de 2030, o aproveitamento projetado é de 126.000 MW, o que equivale a cerca de 48% do potencial total (ANEEL, 2008).

Em nível de bacia hidrográfica, o aproveitamento do potencial hidráulico dos rios se dá em diferentes intensidades. A Figura 2 apresenta o aproveitamento por bacia, bem como os estudos de inventário e estimativa dos recursos a explorar.

Figura 2 – Aproveitamento, inventário e estimativa do potencial hidrelétrico por bacia hidrográfica.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

A Figura 2 mostra que as bacias hidrográficas do Paraná (72%), São Francisco (58%) e Tocantins (44%) apresentam as maiores proporções de potencial explorado. Em contrapartida, a bacia Amazônica, a qual detém o maior potencial hidrelétrico dentre todas as demais bacias (Figura 1), possui apenas 1% de seu potencial aproveitado.

Em 2007, 85,6% da energia ofertada no mercado interno foi produzida a partir de fonte hidráulica (hidreletricidade) (ANEEL, 2008). De modo geral, a maior parte desta energia é produzida por usinas hidrelétricas localizadas na bacia do Paraná, sobretudo nas sub-bacias do rio Paranaíba, rio Grande e rio Iguaçu, e na bacia do São Francisco (ANEEL, 2008).

O número total de Usinas Hidrelétricas (UHE's), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH's) em todo o país no ano de 2008 era de 159, 320 e 227, respectivamente (ANEEL, 2008). Segundo dados do Banco de Informações de Geração (BIG) da Aneel em 2018, o número de UHE's, PCH's e CGH's em operação são 218, 426 e 689, respectivamente. Estes dados refletem um aumento de 37%, 33% e 303% de UHE's, PCH's e CGH's nos últimos 10 anos, respectivamente. Além disso, o número de UHE's, PCH's e CGH's em construção e por construir são 13, 145 e 8 empreendimentos, respectivamente.

Este cenário demonstra que houve um grande aumento do número de empreendimentos hidrelétricos instalados nos últimos anos no país (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). Os fatores mais importantes para a configuração deste cenário nas últimas décadas são o crescimento da população brasileira e o desenvolvimento econômico do país, resultando em demandas cada vez maiores por água e energia (ANEEL, 2008). Do mesmo modo, as perspectivas futuras para o setor hidrelétrico brasileiro são promissoras e revelam uma condição de expansão em função da necessidade crescente por energia elétrica (ROCHA; PASE, 2015).

## 2.2 RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

### 2.2.1 Enchimento e operação de reservatórios de água

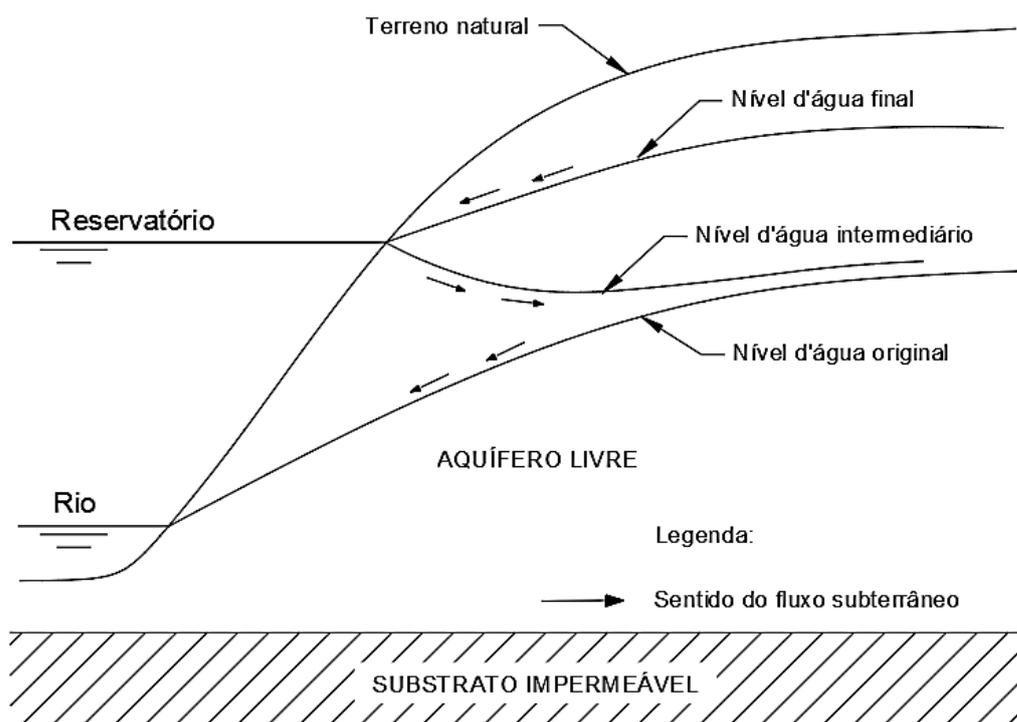
A regulação dos rios através da construção de barragens já modificou a dinâmica hidráulica de mais da metade (172 de 292) dos maiores sistemas fluviais

do mundo (NILSSON et al., 2005). A formação artificial de grandes reservatórios de água por meio do barramento transversal de um rio provoca grandes alterações no espaço onde o empreendimento se encontra.

Uma das complicações decorrentes deste tipo de obra de engenharia diz respeito à mudança (elevação) do nível do lençol freático devido ao enchimento do reservatório, o qual impõe novas condições geotécnicas às encostas adjacentes (CNEC, 1988a; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; VARNES, 1978).

A Figura 3 apresenta a dinâmica à qual o terreno natural é submetido considerando a mudança do nível do lençol freático pela formação e enchimento de um reservatório de água.

Figura 3 – Representação esquemática da mudança do nível do lençol freático devido à formação de um reservatório pelo barramento de um rio.



Fonte: Adaptado de SANTOS JUNIOR et al. (2017).

A partir da Figura 3 observa-se que na condição original o nível do lençol freático dentro do maciço de solo encontra-se mais elevado em relação ao curso de água, o que permite que o fluxo abasteça o canal fluvial. Quando o preenchimento do reservatório é iniciado, o fluxo de água dentro da encosta é alterado. Na medida

em que o nível do reservatório sobe, ocorre a inversão do fluxo no sentido do reservatório para dentro da encosta. Esta fase é crítica, pois a saturação do solo pode resultar em deslizamentos devido ao aumento da poropressão e diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (CNEC, 1988a; SANTOS JUNIOR et al., 2017).

O novo nível do lençol freático só é atingido em longo prazo quando o nível do reservatório atingir sua cota máxima e a conformação da rede de fluxo do lençol freático for similar à condição inicial, ou seja, quando o sentido do fluxo ocorrer do maciço para dentro do reservatório (LAWSON, 1985; SANTOS JUNIOR et al., 2017).

Ao longo da vida útil do reservatório ocorrem sucessivos rebaixamentos (rápidos ou lentos) do nível de água, a depender da demanda energética ou do regime de chuvas da bacia de contribuição, o que resulta na diminuição da estabilidade geotécnica dos taludes adjacentes ao reservatório (MASCARENHA et al., 2017; RODRIGUES, 2007). A diminuição da estabilidade geotécnica ocorre porque o nível do lençol freático dentro do maciço geralmente não é rebaixado na mesma velocidade do nível de água do reservatório, resultando num excesso de poropressão, diminuição da tensão efetiva e conseqüente redução da resistência ao cisalhamento do solo (GERSCOWICH, 2016; GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Este aspecto é especialmente problemático em encostas constituídas predominantemente por solos argilosos.

Em decorrência disso podem ocorrer, com certa frequência, perdas de solos e rochas pelo desencadeamento de movimentos de massa, como por exemplo, deslizamentos, tombamentos, fluxo de detritos, dentre outros (CNEC, 1988a).

### **2.2.2 Erosões em reservatórios de água**

As principais formas de erosão nas margens de reservatórios são desconfiamento e solapamento da base dos taludes, movimentos de massa (deslizamentos, queda de blocos, tombamentos) e *piping*. Estes processos erosivos são desencadeados, em grande parte, pelas ondas formadas na superfície do lago pela ação do vento e pela oscilação sazonal do nível da água do reservatório (NASCIMENTO et al., 2017).

A literatura internacional especializada reporta outras formas de erosão desencadeadas pelo congelamento da água na superfície do reservatório durante o

período de inverno, ciclos sucessivos de congelamento e derretimento da água presente nos vazios do solo, entre outros. No entanto, estas formas de erosões são peculiares e ocorrem com maior frequência em reservatórios localizados em países do hemisfério norte como nos Estados Unidos, Canadá, países europeus e Rússia (ELLIOTT, 1991; GOOD, 1992; LYONS; HARRIS, 1992; REID, 1992).

Outras formas de erosão causadas pelo impacto da água da chuva e do escoamento superficial, como os sulcos, ravinas e voçorocas podem ocorrer ao longo da área de influência ou da área de preservação permanente do reservatório. No entanto estas formas de erosão são menos expressivas ou encontram-se fora da faixa de oscilação do nível de água e, portanto, não serão aprofundadas neste trabalho, uma vez que esta dissertação tem enfoque na ocorrência de processos erosivos resultantes da ação direta das ondas formadas pelo vento na superfície do reservatório.

### **2.2.3 Efeito das ondas em reservatórios**

O solapamento das encostas na faixa de oscilação do nível de operação do reservatório é desencadeado pelo impacto direto de ondas (CHU, 1992; MASCARENHA et al., 2017; NRCS, 2014; QUIGLEY; GÉLINAS, 1976; REID, 1992; SANTOS JUNIOR et al., 2017; SCS, 1983). Este processo ocorre, com maior ou menor intensidade, ao longo de todo o perímetro do reservatório e é o principal responsável pela ocorrência de perda de solo nas margens (LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992; REID, 1992).

A perda de solo pela ação das ondas ocorre em qualquer reservatório, seja natural ou artificial, independentemente de sua área superficial, sendo geralmente mais intenso à medida que o tamanho do corpo de água aumenta. Este fenômeno também pode ser observado, embora em menor intensidade, em margens desprovidas de cobertura vegetal de pequenos açudes.

Os danos diretamente associados à erosão por ondas em reservatórios são múltiplos, como por exemplo perda de solo de uso econômico e/ou recreativo, aumento de transporte de sedimentos, favorecimento de ocorrência de deslizamentos, danos a obras de infraestrutura (estradas, casas, estaleiros, etc), danos a recursos culturais, entre outros (LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992). Outros tipos de impactos resultantes são perda de vegetação ripária, degradação de

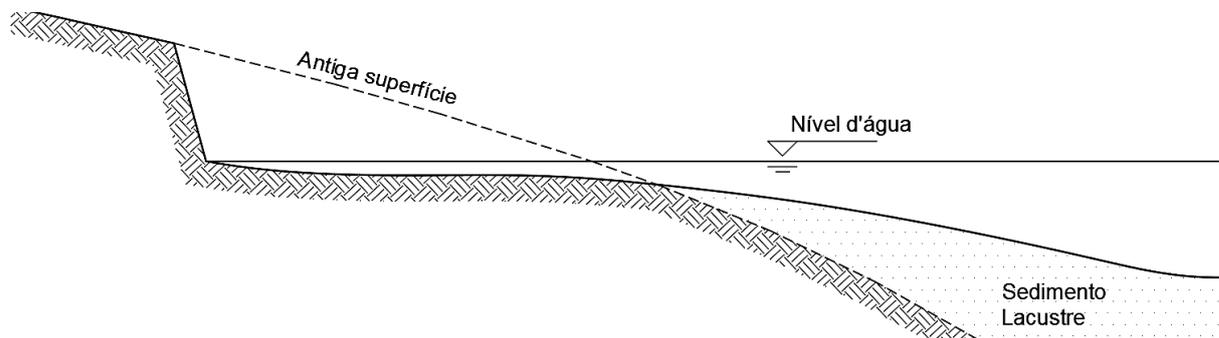
áreas úmidas e de planície, danos a sítios arqueológicos e históricos e degradação de habitats aquáticos provocados pela deposição (assoreamento) do solo removido na margem (GOLDSMITH, 1992; PORTER, 1992; ZABAWA; RATCLIFFE; HOCHHEIMER, 1992). Além disso, a perda de solo nas margens causa assoreamento do reservatório, o que pode diminuir a vida útil do mesmo.

A soma destes efeitos adversos resulta em perdas ambientais, culturais, econômicas e estéticas, além de favorecer a diminuição da qualidade da água que resulta em impactos diretos à vida aquática, silvestre e humana, as quais dependem direta e indiretamente do reservatório (GOLDEN, 1992). A visualização explícita destes danos pela sociedade em geral converte-se em críticas por parte do público afetado (BHOWMIK, 1978).

O solapamento do talude pela ação das ondas ocorre porque a inclinação crítica do fundo foi superada. Quando isso ocorre, uma nova inclinação de equilíbrio necessita ser estabelecida, acarretando na movimentação de solo pela água e na formação de uma plataforma de abrasão com inclinação menor que a do terreno natural (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017; LAWSON, 1985).

A Figura 4 apresenta, de forma esquemática, a conformação original e a conformação obtida no longo prazo pela ação erosiva da água do reservatório.

Figura 4 – Representação esquemática da conformação inicial do terreno e conformação definitiva resultante da influência do reservatório.



Fonte: Adaptado de MACIEL FILHO; NUMMER (2014).

A formação das ondas na superfície do reservatório pode ser provocada por fenômenos naturais como o vento ou por fatores antrópicos, como por exemplo, a

circulação de embarcações para fins de transporte de cargas ou de recreação (CHU, 1992; MASCARENHA et al., 2017; NRCS, 2014; PORTER, 1992).

O monitoramento de erosões causadas por ondas geradas por embarcações é de difícil observação e quantificação, dado que a previsibilidade e a frequência da circulação de barcos no reservatório são complexas de serem determinadas (CHU, 1992; NRCS, 2014). Mesmo assim, observou-se que em pequenos reservatórios as ondas produzidas por barcos podem ser maiores que as produzidas pelo próprio vento (NRCS, 2014), possuindo, portanto, grande importância como agentes indutores de ondas (CHU, 1992). De modo geral, a altura das ondas desenvolvidas por pequenos barcos de recreação e pesca é da ordem de aproximadamente 15 cm, o que representa  $\frac{1}{4}$  (um quarto) da altura de ondas produzidas por barcos de grande porte (BHOWMIK et al., 1991). Este efeito pode ser ainda mais adverso considerando o relato de Goldsmith (1992) que comenta que ondas geradas por barcos podem ser de 10 a 100 vezes mais danosas comparadas a ondas geradas pelo vento, considerando as mesmas condições do local.

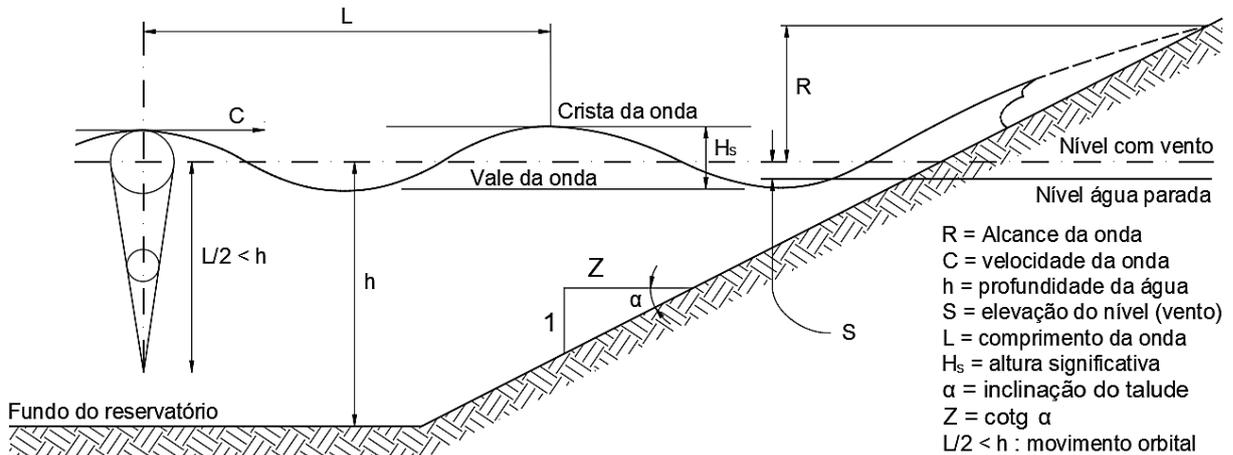
Em relação ao agente natural (vento), independentemente do mecanismo de indução, a formação das ondas ocorre pela transferência de energia por atrito do vento com a superfície da água no reservatório (SALES et al., 2017). Apesar da descrição simplificada, o mecanismo exato de perturbação do fluido pelo vento ainda não foi completamente desvendado pela ciência (LAWSON, 1985; MASCARENHA et al., 2017), o que pode dificultar, em parte, a análise e compreensão deste processo (SCS, 1983).

Em termos de nomenclatura relacionada às ondas, a Figura 5 apresenta alguns dos termos mais importantes utilizados na sua descrição.

Em relação à intensidade de ação das ondas, as maiores taxas de erosão em margens de reservatórios ocorrem durante ventos intensos (tempestades, vendavais), os quais podem produzir ondas superiores a 2 m de altura em reservatórios com grande área superficial, como é o caso da região sul do Brasil (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). Neste sentido, o relevo acidentado ou inclinado de uma região exerce grande influência na formação das ondas, já que o vento tende a soprar com maior intensidade ao longo de vales encaixados e confinados pelas encostas adjacentes (USACE, 1997). Outros fatores como o tamanho, a forma e a orientação do reservatório podem afetar direta ou

indiretamente a importância e a intensidade com a qual os processos são desencadeados (LAWSON, 1985).

Figura 5 – Nomenclatura utilizada na descrição de ondas.



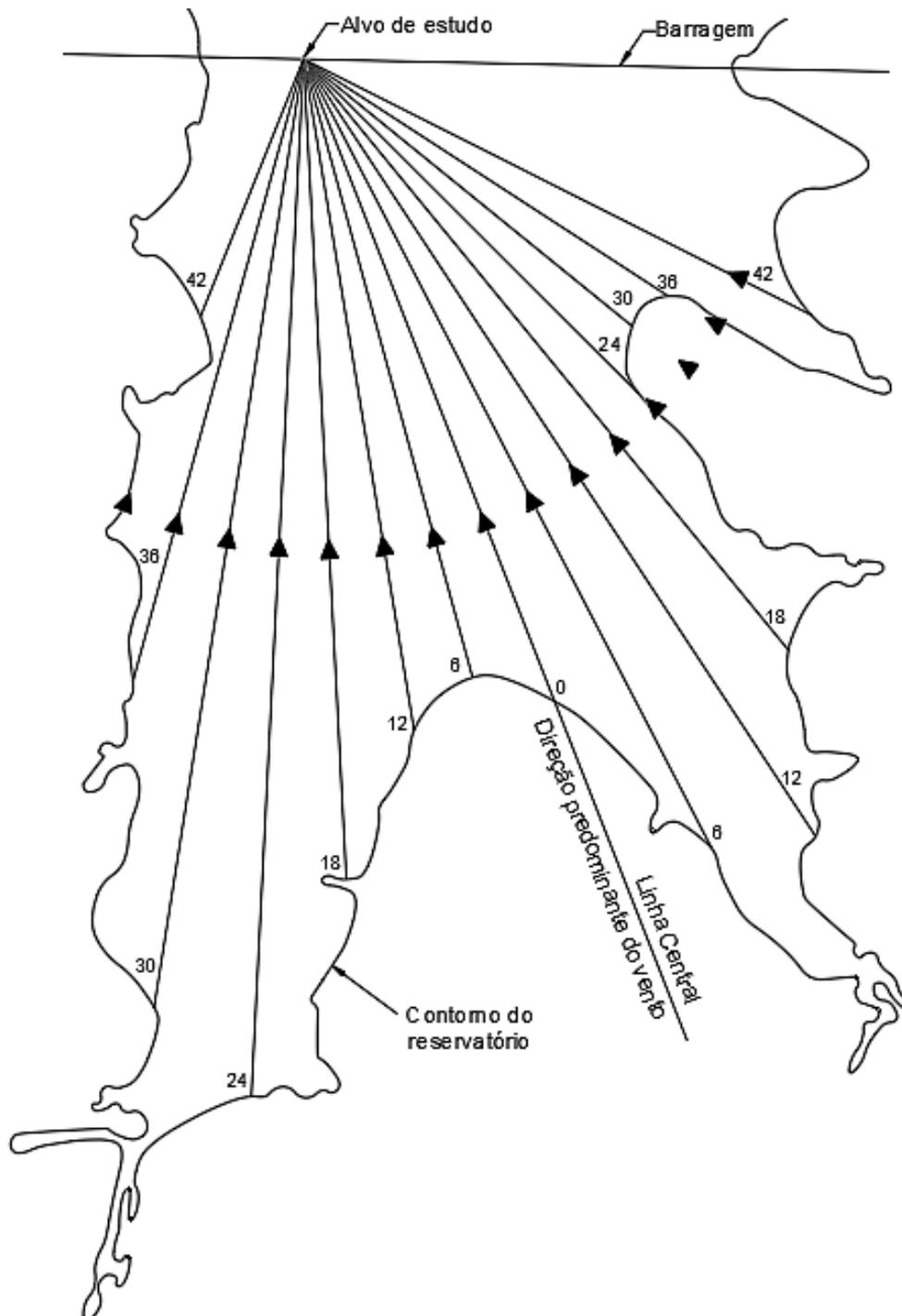
Fonte: Adaptado de SCS (1983).

A altura da onda está diretamente relacionada com a sua energia ou poder erosivo, sendo a sua estimativa de grande importância no dimensionamento de estruturas de proteção de barragens e taludes (NRCS, 2014). Do ponto de vista prático, o levantamento de dados a campo para modelagem do comportamento de ondas em reservatórios é dispendioso e demanda quantidade significativa de recursos financeiros, sendo, portanto, uma prática não aconselhada. Esta dificuldade pode ser superada valendo-se de métodos e dados disponíveis na literatura e no meio digital (CHU, 1992).

A modelagem analítica da altura das ondas em reservatórios é função do *fetch* (comprimento na superfície do reservatório para atuação do vento) (Figura 6) e das condições do vento influenciadas em maior ou menor escala pela topografia e condições meteorológicas da região (SCS, 1974; USACE, 1997).

O procedimento apresentado a seguir é uma ferramenta simples e útil para a determinação analítica da altura das ondas em reservatórios de água (NRCS, 2014; SCS, 1974, 1983; USACE, 1997).

A primeira variável a ser determinada é a direção do vento. Sua determinação pode ser realizada por meio de consulta de dados climatológicos oriundos de estações meteorológicas da região ou a partir de material bibliográfico (CHU, 1992).

Figura 6 – Representação esquemática de um reservatório para determinação do *fetch*.

Fonte: Adaptado de NRCS (2014).

O *fetch* é a maior distância ininterrupta sobre a superfície da água sobre a qual o vento sopra para produzir ondas. Esta distância é determinada a partir de um ponto na margem submetido à ação das ondas (ponto em processo erosivo) e limitada pelas margens do reservatório.

A determinação do *fetch* pode ser realizada a partir de uma imagem aérea orbital, mapa digital ou outra forma de representação geográfica que contenha os limites topográficos (perímetro) do corpo de água em análise. Sobre a representação geográfica do reservatório é estabelecida uma linha central que deve estar alinhada com a direção do vento determinada anteriormente. A partir da linha central são determinadas sete linhas para ambos os lados mantendo um ângulo de 6° entre cada uma delas, formando um arco de 42° em relação à linha central. Cada linha deve ser estendida desde o ponto em estudo até o ponto de interceptação com a margem do reservatório ou obstáculos topográficos, como ilhas, por exemplo.

A seguir procede-se à mensuração do comprimento de cada linha desenhada multiplicando-a pelo cosseno do ângulo formado em relação à linha central, de modo que se possa determinar o *fetch* efetivo ( $F_E$ ) a partir da Equação 1 (NRCS, 2014):

$$F_E = \frac{\sum(\text{comprimento} \times \cos \alpha)}{\sum \cos \alpha} \quad (1)$$

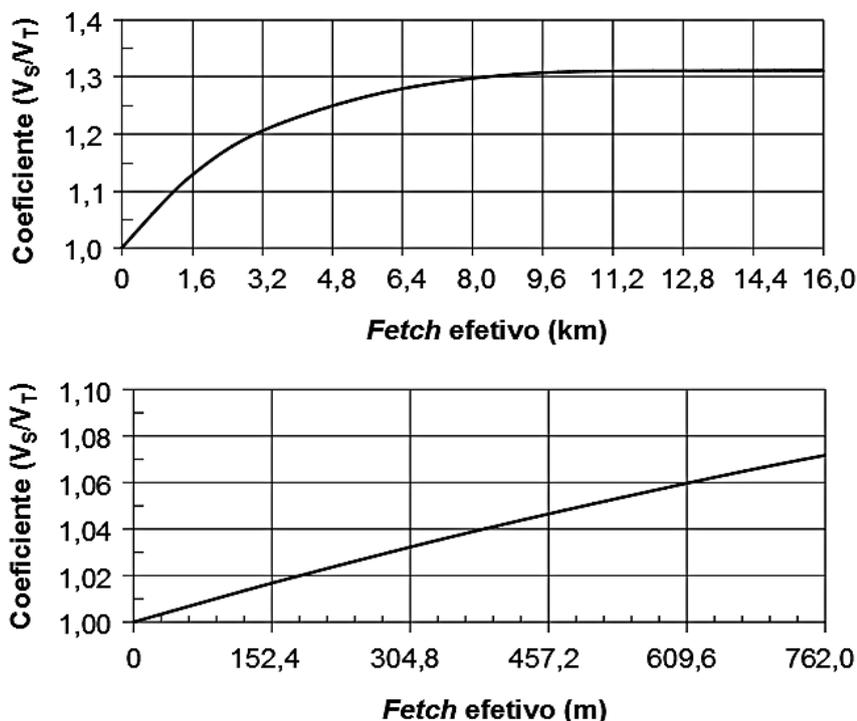
A determinação da velocidade do vento sobre a superfície terrestre ( $V_T$ ) pode ser obtida a partir de estações meteorológicas localizadas nas proximidades do reservatório. A partir desta velocidade deve ser determinada a velocidade do vento sobre a superfície do reservatório ( $V_S$ ). Esta estimativa pode ser realizada com base em ábacos disponíveis na literatura especializada, como os apresentados na Figura 7.

A velocidade do vento sobre o espelho de água tende a ser superior à velocidade terrestre, tendo em vista o confinamento do fluxo resultante da topografia e a ausência de obstáculos físicos sobre a água.

A seguir é determinada a altura significativa ( $H_S$ ) das ondas em função do *fetch* efetivo e da velocidade do vento na superfície da água pela seguinte Equação 2 (NRCS, 2014):

$$H_S = 0,0232 \times V_S^{1,06} \times F_E^{0,47} \quad (2)$$

Figura 7 – Relação entre a velocidade do vento sobre a superfície terrestre ( $V_T$ ) e sobre a superfície do reservatório ( $V_S$ ) para diferentes comprimentos de *fetch*.



Fonte: Adaptado de NRCS (2014).

A altura significativa é a média da altura de 33% das ondas mais altas em um trem de ondas (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017) e é um indicativo da energia cinética das ondas que atingem o barramento e as margens do reservatório. A Equação 2 é válida quando o comprimento da onda, ou distância entre ondas consecutivas, é inferior a duas vezes a profundidade da água (NRCS, 2014).

A Equação 2 mostra relação de proporcionalidade que, quanto maior for a velocidade do vento e o *fetch* ao qual um determinado ponto na margem estiver submetido, maior será a altura das ondas e sua energia, sujeitando-o a uma maior intensidade erosiva.

Além dos fatores apresentados acima, a conformação das margens do reservatório também exerce grande influência na propagação e embate das ondas no pé do talude. Em longo prazo, a plataforma de abrasão formada no pé do talude tende a uma conformação mais larga e suave, o que contribui para a estabilização das margens (REID, 1992). Quanto mais suaves e largas forem estas plataformas, maior será a absorção e dissipação da energia das ondas antes de atingirem o pé do talude (REID, 1992).

Lagos com *fetch* limitado e de águas rasas permitem o desenvolvimento de ondas de baixa a moderada energia durante dias normais (TANNER, 1971). Mas mesmo assim, ondas geradas nestes tipos de reservatórios durante uma tempestade podem desenvolver grande energia, o que pode resultar em mudanças rápidas e consideráveis na plataforma de abrasão e no talude (FOX; DAVIS, 1973).

Em relação à propagação das ondas na plataforma de abrasão, estas são proporcionalmente afetadas pela inclinação do fundo a partir do momento em que a profundidade da água se iguala a metade do comprimento da onda (LAWSON, 1985). Neste momento o comprimento e a velocidade de propagação das ondas diminuem em favorecimento do incremento em altura (KFK, 2007). A rebentação das ondas ocorre quando a sua altura se iguala à profundidade da água, que é o momento em que a velocidade de propagação da crista excede a velocidade do corpo da onda (COKELET, 1977; WIEGEL, 1992).

De modo geral são reportados três tipos principais de rebentação de ondas próximo da margem, valendo tanto para ondas em ambiente litorâneo como em reservatórios (COKELET, 1977; HACKER; JOHANNSEN, 2012; KFK, 2007).

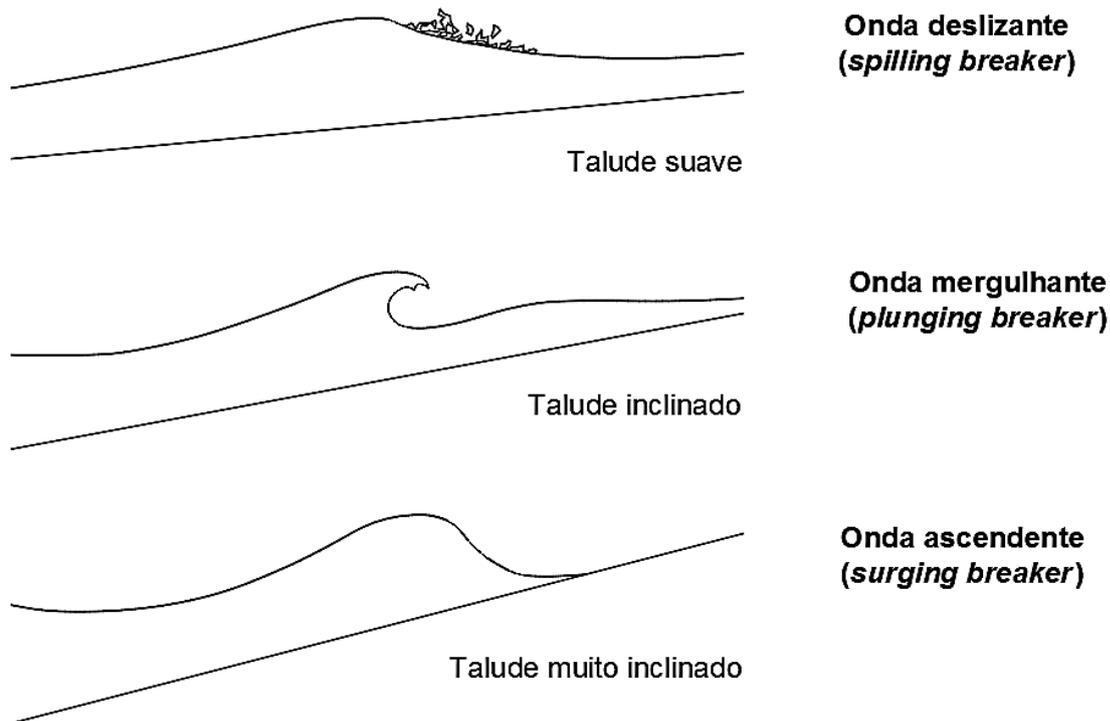
As características do formato da crista e da forma de rebentação são diretamente dependentes da inclinação da plataforma de abrasão e da declividade das ondas (LAWSON, 1985), como pode ser observado na Figura 8.

A crista de onda tipo deslizante torna-se íngreme gradualmente e começa a rebentar de forma suave formando uma zona com espuma e bolhas de água devido ao desenvolvimento de um fluxo turbulento. No tipo mergulhante ou tubular, a crista da onda adquire altura e inclinação, curva-se para frente formando um tubo e quebra abrupta e violentamente. A rebentação tipo ascendente ocorre em taludes ou praias muito inclinadas como geralmente é o caso do paramento montante de uma barragem, de tal forma que a onda não quebra propriamente dito, já que as ondas ascendem o paramento formando espuma e bolhas de água e interagindo com as ondulações formadas pelas ondas anteriores (LAWSON, 1985).

A rebentação tipo deslizante ocorre em plataformas pouca inclinadas. A rebentação do tipo mergulhante tende a ser observada em plataformas com inclinações médias, enquanto que a rebentação tipo ascendente se dá em plataformas com alto gradiente topográfico. Neste sentido, ondas do tipo deslizante dissipam sua energia mais eficientemente ao longo de uma plataforma alongada,

enquanto que ondas do tipo ascendente dissipam uma grande quantidade de energia rampeando o talude ou a encosta sobre a qual elas incidem (WIEGEL, 1992; WOOD; FLEMING, 1981).

Figura 8 – Diferentes tipos de rebentação de ondas resultantes da conformação da plataforma de abrasão.



Fonte: Adaptado de KFK (2007).

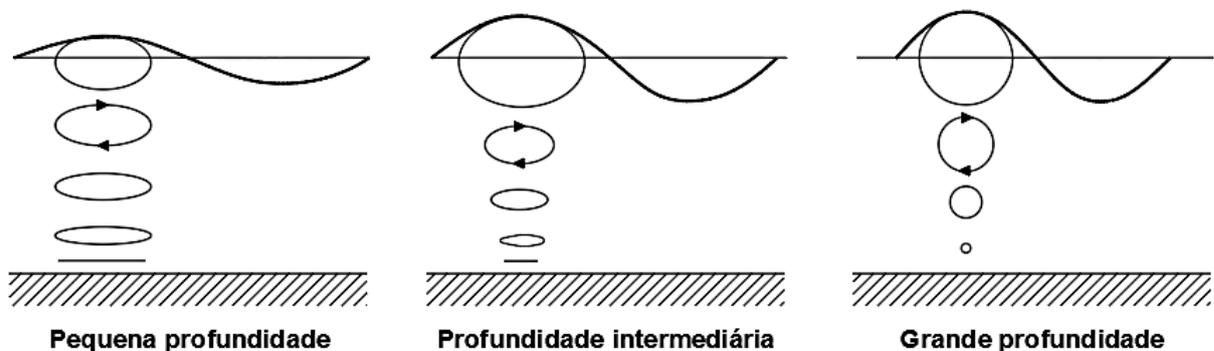
Para a realidade de reservatórios artificiais em que geralmente se verifica uma rápida diminuição da inclinação do fundo junto à margem, os tipos de rebentação deslizante e mergulhante tendem a ser observados com maior frequência do que em reservatórios naturais (LAWSON, 1985).

Em condições que favorecem a ocorrência de erosões, as ondas rebentam diretamente na face do talude e toda a energia é dissipada nestes sedimentos, gerando turbulências e outros tipos de movimentos complexos nas zonas adjacentes ao talude (LAWSON, 1985). O transporte de sedimentos próximo da margem é induzido pelos movimentos orbitais da água gerados pelas ondas associado com a carga de sedimento suspenso e do leito (INMAN; BOWEN, 1962).

Segundo a teoria linear das ondas, durante o movimento orbital da água não há transporte de massa associado. Enquanto a relação profundidade da água e

comprimento da onda for maior do que 0,5 ocorre movimento orbital da massa de água em formato de círculo, o qual diminui exponencialmente com a profundidade (ALLEN, 1982). Em zonas intermediárias em relação à profundidade próxima da margem, o movimento orbital circular da água adquire formato de elipse, cujo eixo horizontal decresce com a diminuição da profundidade, tornando-se cada vez mais restrito até permanecer constante, até o ponto que em águas superficiais somente movimentos horizontais sejam possíveis (KFK, 2007) (Figura 9).

Figura 9 – Movimento orbital da água considerando diferentes profundidades da água.



Fonte: Adaptado de ALLEN (1982).

A Figura 10 apresenta de forma esquemática o movimento orbital da água gerado por ondas do tipo mergulhante.

A movimentação de sedimentos e a profundidade onde esse processo ocorre é dependente do tamanho e do período da onda<sup>1</sup> e, conseqüentemente, do máximo *fetch* efetivo e das características do sedimento (HAKANSON, 1977).

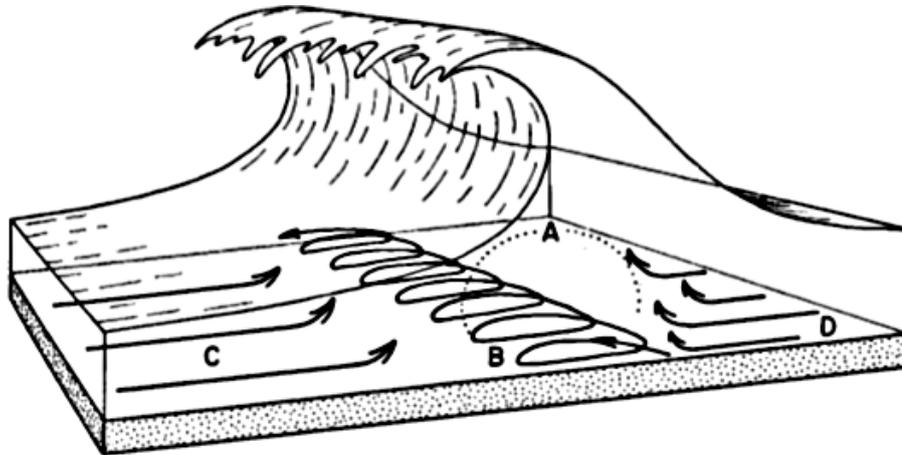
Estimativas da profundidade na qual as ondas são capazes de iniciar a movimentação de sedimentos em margens de reservatórios demonstram guardar relação com o *fetch* efetivo, a velocidade do vento e o tamanho do grão (JOHNSON, 1981 apud LAWSON, 1985), conforme pode ser observado na Figura 11.

Com base na literatura especializada, as ondas do tipo mergulhante transportam mais sedimentos do que ondas do tipo deslizante, pois possuem capacidade de suspender material muito fino como siltes e argilas (KANA, 1979).

<sup>1</sup> O período da onda ( $T$ ) é o intervalo de tempo entre o início e o fim da onda, ou seja, o intervalo entre duas passagens consecutivas pelo nível zero (na descida ou na subida da onda (FORMIGA et al., 2017).

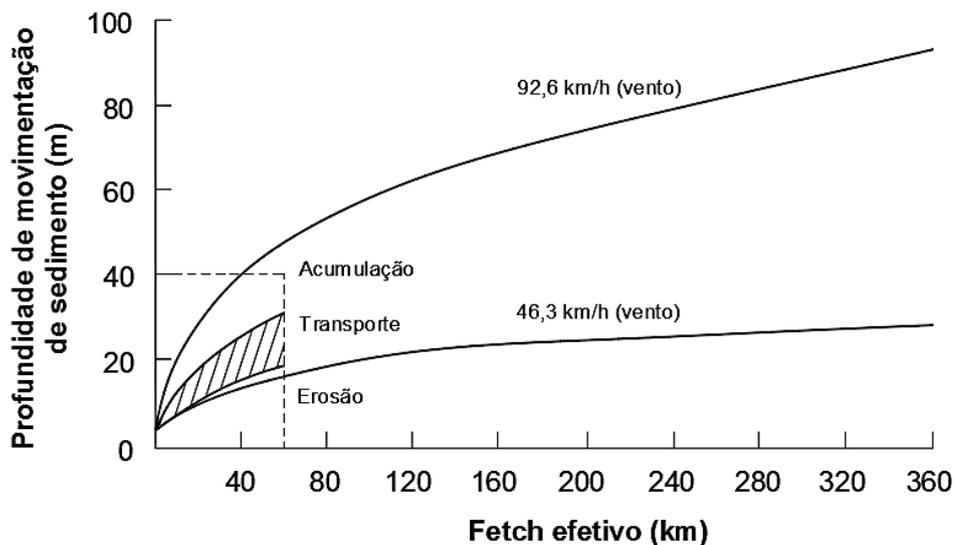
Desta forma, ondas do tipo mergulhante apresentam função muito importante na escavação e remoção de sedimentos junto à margem devido à maior energia liberada e dissipada no momento da rebentação (COKELET, 1977).

Figura 10 – Representação esquemática de movimentação de sedimentos embaixo de uma onda. O material grosseiro presente no fundo do leito salta para a posição B. Uma grande percentagem de material segue trajetórias variadas, desde movimentos horizontais a trajetórias elípticas achatadas durante o colapso de cada onda. O material fino viaja suspenso na posição A. O material em frente (C) e atrás (D) da zona de rebentação move-se em direção à onda. O diâmetro do material em cada posição é função da energia da onda.



Fonte: (INGLE, 1966).

Figura 11 – Comparação entre *fetch* efetivo e profundidade de movimentação de sedimentos em função de diferentes velocidades de vento. Os dados de erosão, transporte e acumulação de sedimentos de 0,1 mm de diâmetro a uma dada profundidade presentes no box hachurado foram observados no lago Vänern por Hakanson (1977).

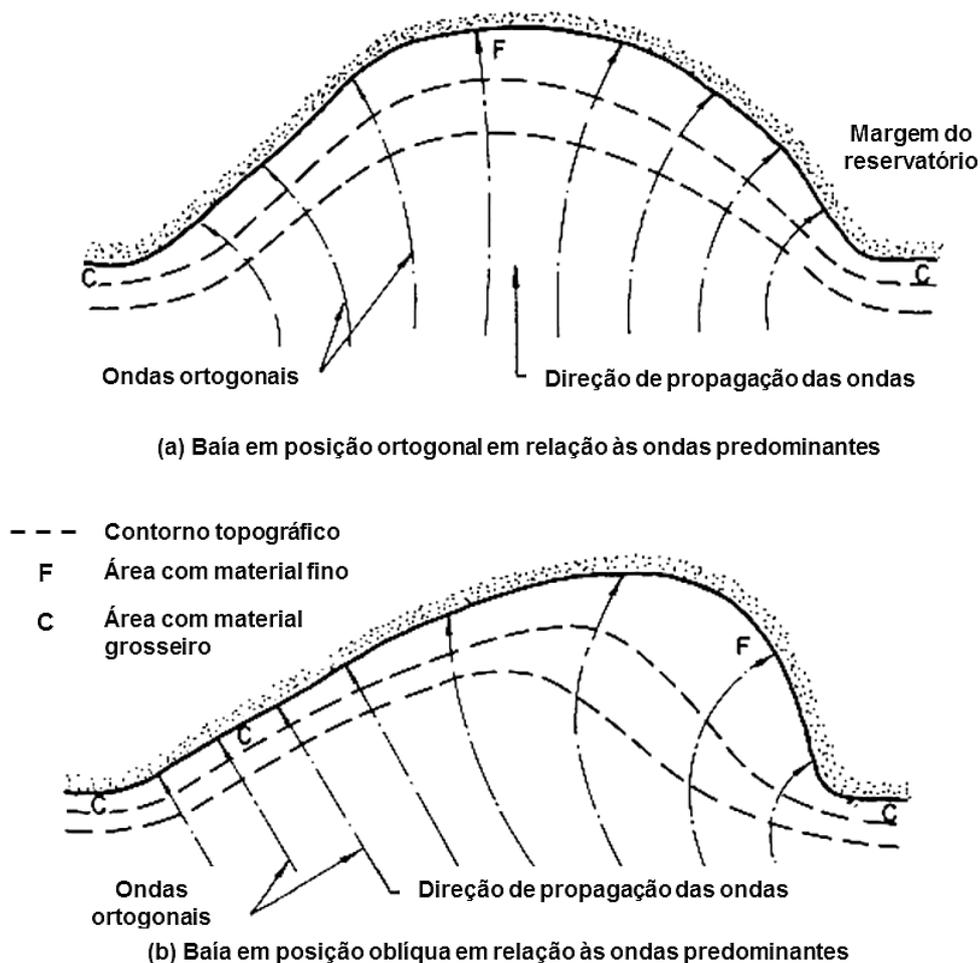


Fonte: Adaptado de JOHNSON, 1981 apud LAWSON (1985).

Outro aspecto pertinente do ponto de vista de transporte de sedimentos diz respeito à propagação de ondas convergentes e divergentes em relação à margem. As ondas divergem e convergem porque sofrem refração em zonas de águas superficiais, de modo que a direção de propagação ocorre aproximadamente perpendicular em relação às curvas de nível do terreno submerso (LAWSON, 1985).

Desse modo, zonas com ondas convergentes concentram maior energia pela formação de ondas mais altas (plataforma de abrasão com alta inclinação), enquanto que em zonas com ondas divergentes a energia é menor devido ao desenvolvimento de alturas menores (plataforma de abrasão com baixa inclinação) (LAWSON, 1985). O fenômeno de convergência e divergência de ondas em margens irregulares pode ser observado de forma esquemática na Figura 12.

Figura 12 – Influência da forma da baía e configuração da margem sobre a convergência e divergência de ondas.



Esta constatação sugere que diferentes pontos ao longo de um pequeno trecho de margem com conformações irregulares poderão estar sujeitos a diferentes intensidades de erosão. Esta constatação explica, em grande parte, a predominância de material grosseiro em alguns pontos e material fino em outros.

#### **2.2.4 Fatores limitantes da resistência mecânica dos taludes**

A resistência mecânica das encostas e taludes que delimitam o reservatório depende principalmente da composição granulométrica, estratigrafia, estrutura e umidade inicial do solo, orientação da margem, inclinação e altura do talude (REID, 1992; THORNE; TOVEY, 1981).

Em relação à composição granulométrica, as propriedades físicas dos solos como a natureza, forma, tamanho, densidade e arranjo condicionam a erodibilidade do material. Solos argilosos são menos propensos à erosão devido à presença de forças de coesão entre as partículas em comparação com solos friáveis (sem coesão) (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). A combinação destes e de outros fatores intrínsecos direciona o comportamento de cada tipo de solo (GOOD, 1992; LAWSON, 1985; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

A existência de estratos de solo ao longo de rios e encostas se dá geralmente devido a processos antigos de deposição fluvial ou movimentos de massas de solo (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Em locais com ocorrência de camadas de solo pouco resistentes e recobertas por camadas de material fino e coeso, a erosão tende a ser mais intensa pela existência de planos de fraqueza, o que resulta em um recuo mais acelerado da margem (LAWSON, 1985; REID, 1992).

A umidade inicial do talude está atrelada a um evento chuvoso precedente ou outro processo de umidificação do solo, o que pode diminuir a resistência ao cisalhamento do material, tornando-o mais suscetível à ocorrência de processos erosivos em eventos chuvosos subsequentes (HOOKE, 1979; REID, 1992). Taludes orientados para o norte tendem a apresentar maior umidade, já que ficam menos expostos à radiação solar, o que por sua vez resulta em maiores depósitos de solo na base pela queda de material (ELLIOTT, 1991; REID, 1992).

A orientação das margens no reservatório é fator condicionante da intensidade de solapamento da base do talude. Elliott (1991) relata que a orientação

é um fator importante para explicar o recuo observado das margens do lago Sakakawea, nos Estados Unidos.

Áreas orientadas a favor de um *fetch* maior tendem a sofrer maiores perdas de solo pelo embate de ondas. Áreas localizadas e orientadas em pontos do reservatório com menor atuação do vento (*fetch* menor), como em baías protegidas pelo relevo, a remoção de solo tende a ser menor devido ao embate de ondas com altitudes menores (REID, 1992).

Quanto à inclinação, quanto mais íngreme o talude ou a encosta for, mais instável ela será (GOOD, 1992; REID, 1992). Taludes mais inclinados tendem a deslocar o seu centro de gravidade para posições geotecnicamente menos favoráveis, o que pode acarretar em movimentos de massa ou deslizamentos de solo (DURLO; SUTILI, 2014). Taludes inclinados são submetidos a forças solicitantes maiores pela existência de uma maior tensão normal e resistência de atrito resistente à fratura do maciço (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Através da alteração da geometria (diminuição da inclinação) podem-se melhorar imediatamente e de forma permanente as condições de estabilidade do local, diminuindo riscos de perdas de solo por erosão (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014).

A altura do talude também é um fator importante que pode condicionar o volume de solo perdido e a velocidade de recuo das margens (CASADO et al., 2002; REID, 1992; THORNE; TOVEY, 1981). Este tópico também é de grande importância no estudo do recuo de taludes localizados nos raios externos de áreas meandranter em cursos de água naturais (CASADO et al., 2002; HUPP et al., 2009; LAWLER et al., 1999; LAWLER; LEEKS, 1992; SILVA et al., 2007; THORNE, 1991; THORNE; TOVEY, 1981; WOLMAN, 1959).

De modo geral, assume-se que quanto maior a altura do talude, maior é o volume de solo erodido durante eventos pluviométricos sucessivos. No entanto, a formação de taludes altos só é possível em locais com topografia acidentada, como geralmente é o caso de encostas ao longo de reservatórios (REID, 1992). Quanto mais alto for o talude, maior será a área superficial disponível sobre a qual os diferentes processos erosivos podem atuar, como por exemplo, o impacto da gota da chuva, o escoamento superficial, a erosão eólica, dentre outros (REID, 1992). Segundo Reid (1992), o volume de solo coluvionar na base do talude é condicionado

pela altura do talude, de forma que taludes com mais que 9,0 m de altura podem apresentar 3 vezes mais solo depositado em sua base em comparação com taludes que possuem entre 4,5 m e 9,0 m de altura.

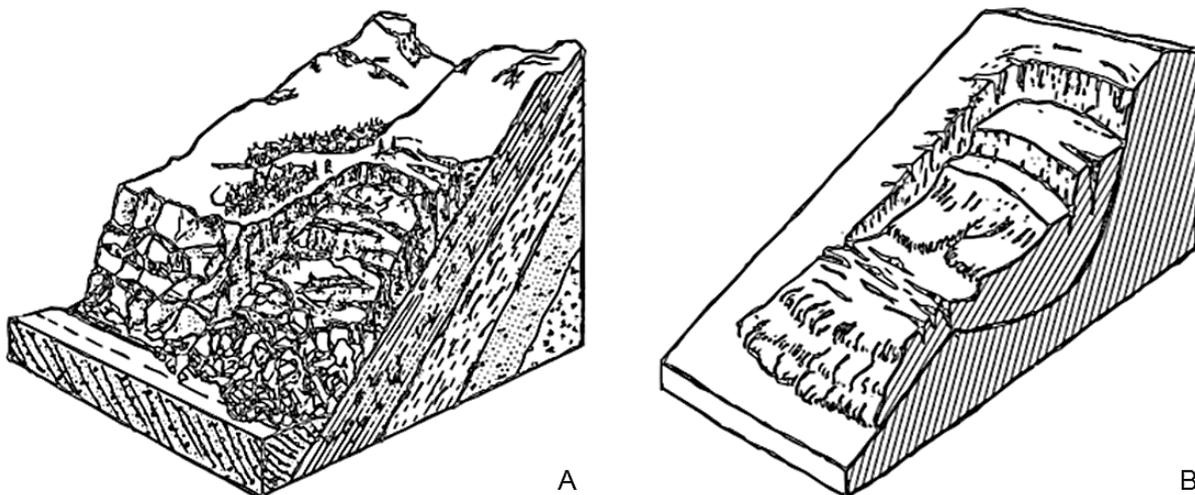
Estas constatações reforçam a ideia de que a análise da erosão em margens de reservatórios é complexa e que vários fatores podem atuar concomitantemente para a sua deflagração (CHU, 1992; LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992). No entanto, o efeito adverso gerado pelas ondas é de longe o mais significativo em relação à perda de solo (REID, 1992).

### 2.2.5 Movimentos de massa

Os movimentos de massa que ocorrem com maior frequência nas margens de reservatórios são deslizamentos do tipo escorregamentos que podem apresentar superfície de ruptura planar ou circular, conforme pode ser observado na Figura 13.

Os movimentos translacionais (ou planares) ocorrem sobre superfícies de ruptura preexistentes e planas e apresentam uma profundidade aproximadamente constante ao longo da camada deslizante (DURLO; SUTILI, 2014), enquanto que movimentos rotacionais apresentam superfícies de ruptura circulares com profundidades variáveis (VARNES, 1978).

Figura 13 – Tipos de deslizamentos que ocorrem em taludes de reservatórios. (A) escorregamento translacional e (B) escorregamento rotacional.

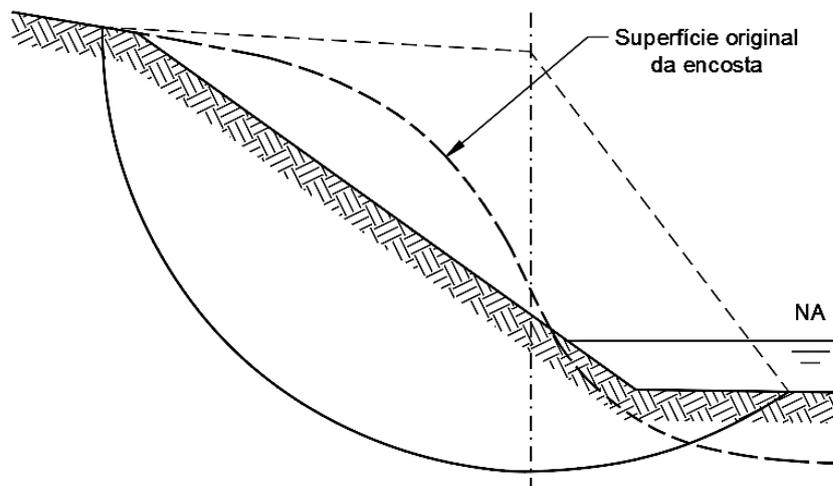


Estes movimentos, assim como outros, ocorrem quando há redução da resistência ao cisalhamento do maciço até a unidade (estado de equilíbrio), levando o solo a romper (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Os fatores que podem desencadear estes deslizamentos em encostas naturais ou em taludes são a saturação do solo (aumento da componente normal) (CHRISTOFOLETTI, 1980; DURLO; SUTILI, 2014), aumento da poropressão (diminuição da tensão efetiva) (FIORI; CARMIGNANI, 2009; GUIDICINI; NIEBLE, 1983), as características inconsolidadas do solo, a geometria das encostas (altas inclinações) e o baixo índice de cobertura vegetal (NASCIMENTO et al., 2017).

Ao longo de margens de reservatórios, a ocorrência destes movimentos pode ser comum e geralmente está atrelada em maior proporção à remoção da base de sustentação do talude pelo efeito de solapamento promovido pelas ondas (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; REID, 1992), bem como pela rápida oscilação do nível de água (CNEC, 1988a; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014). A presença de antigas pedreiras próximas das margens inundadas pelo reservatório contribui para a perda de estabilidade da base da encosta, o que por sua vez pode provocar a indução de grandes movimentos de massa.

No entanto, a minimização destes tipos de deslizamentos pode ser realizada através da mudança da geometria do talude, o que aumenta a estabilidade do local (GERSCOWICH, 2016; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MASSAD, 2010) (Figura 14).

Figura 14 – Aumento da estabilidade do talude em razão da alteração da sua geometria.



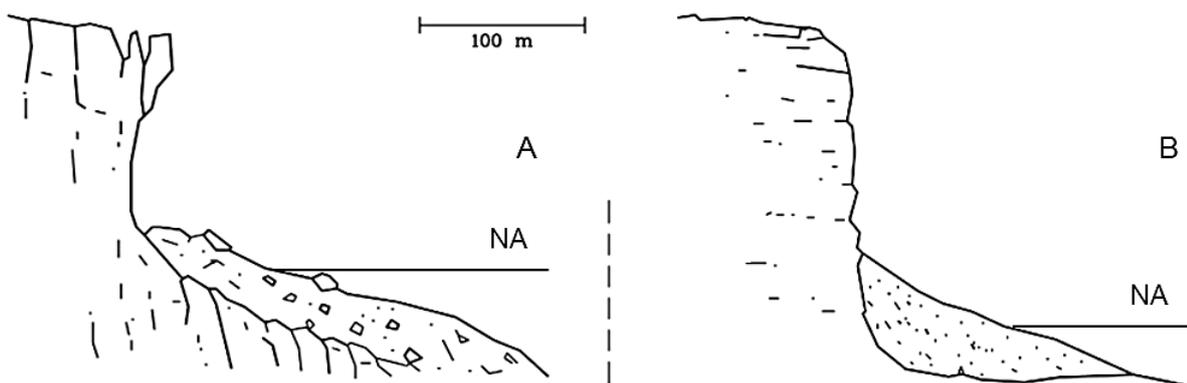
Fonte: Adaptado de MASSAD (2010).

Movimentos de massa do tipo tombamentos e quedas de solo ou blocos de rocha são ocasionados em taludes verticais ou com inclinação negativa pela ação da gravidade (CORREA; FILHO, 2009). Altas inclinações dos taludes podem ser decorrentes do efeito de estruturação do solo conferido pelas raízes das plantas, pela própria coesão do solo (solos argilosos) ou pelo efeito de solapamento e erosão da base dos taludes (MASSAD, 2010). Este último ocorre amplamente em reservatórios de água e é apresentado esquematicamente na Figura 15.

Nestas condições, à medida que as ondas retiram a sustentação da base do talude, a porção de solo presente na crista rompe e deposita-se na sua base (GUIDICINI; NIEBLE, 1980; REID, 1992). O material depositado na base é então removido e transportado para dentro do reservatório, na medida em que o nível da água oscila.

A movimentação de blocos de rocha pelo recuo da margem do reservatório ocorre com maior frequência do que a movimentação de maciços inteiros de rocha. Na medida em que o efeito das ondas promove o recuo das margens, os blocos de rocha remanescentes na superfície do terreno natural próximos da crista do talude tendem a rolar para dentro do reservatório, depositando-se próximos da sua base.

Figura 15 – Tombamento de solo. (A) material grosseiro e (B) material fino.



Fonte: Adaptado de DURLO; SUTILI (2014).

Além disso, o desprendimento de pequenos fragmentos de solo fino pode ocorrer com frequência na face exposta de taludes com constituição argilosa. Em função de ciclos sucessivos de umedecimento e secagem da superfície do talude ocorre o desprendimento de solo, por vezes em formas de placas, o qual é

depositado na base do talude. Este fenômeno é especialmente intensificado quando os solos dos taludes são constituídos por argilas expansivas.

Em todo caso, os diversos tipos de tombamentos e quedas ocorrem com pouca frequência, visto que somente uma pequena percentagem de taludes lacustres apresentam inclinações elevadas (REID, 1992).

### **2.2.6 Piping**

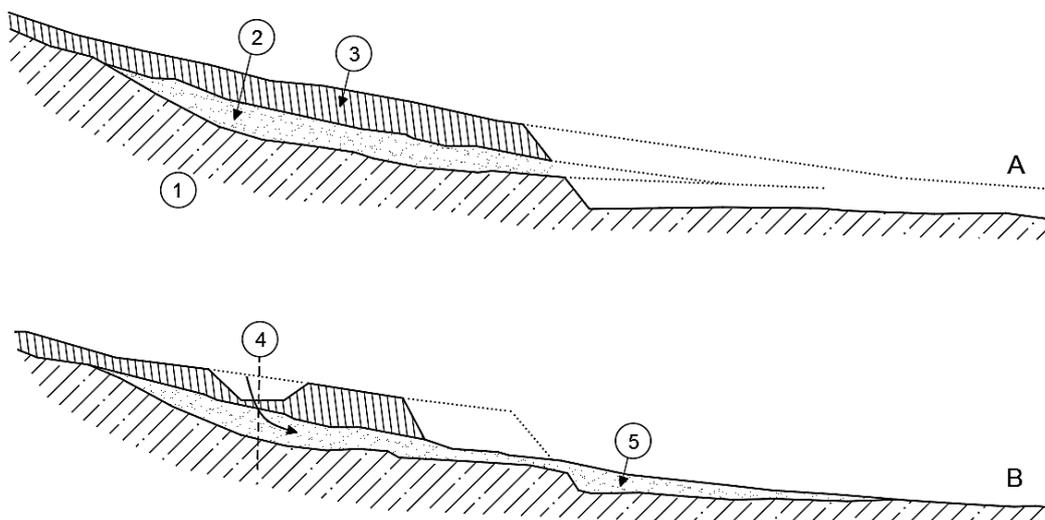
A erosão tipo *piping* é um processo resultante da pressão de percolação da água que escoam em subsuperfície (FIORI; CARMIGNANI, 2009; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014) e está diretamente relacionada à oscilação do nível da água do reservatório, que depende do regime pluviométrico da bacia de contribuição e da demanda energética. Com as frequentes subidas e descidas do nível de operação do lago, a percolação da água promove a retirada de partículas de solo dos taludes adjacentes, o que conduz à eluviação ou esqueletização do maciço de solo (BORGES, 2004; SANTOS JUNIOR et al., 2017).

O processo de eluviação, através da remoção física ou dissolução do material mais fino, também contribui em grande escala para a formação de canais à superfície, na medida em que o processo progride (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). Com o passar do tempo, o maciço perde sua estrutura de sustentação e rompe ocasionando pequenos deslizamentos. No entanto, este processo pode evoluir até a formação de ravinas e voçorocas, na medida em que a erosão progride para dentro do maciço de solo (LIMA et al., 2017; ROMÃO; SOUZA, 2017; SANTOS JUNIOR et al., 2017). Esta situação ocorre com maior frequência em reservatórios da região sudeste do Brasil (LIMA et al., 2017), podendo ocorrer com maior frequência ao longo de fraturas, em zonas de intemperismo do manto no contato entre rocha e saprólito (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017) e em camada subjacentes de solo depositado (GUIDICINI; NIEBLE, 1980).

A erosão do tipo *piping* ocorre com maior intensidade em solos arenosos ou com pouca coesão (GUIDICINI; NIEBLE, 1980) ou em camadas do perfil do solo que tenham sofrido grande lixiviação, como é o caso do horizonte C (VIÉRO, 2004).

A Figura 16 ilustra esquematicamente um exemplo de erosão causada por *piping* em áreas de corte de encosta.

Figura 16 – Representação esquemática de erosão tipo *piping* em camada arenosa favorecida pelo corte da encosta para extração de minérios (a) e execução de uma estrada (b). (1) folhelhos; (2) areia fina; (3) marga (tipo de calcário argiloso); (4) corte de uma rodovia e (5) depósito de areias.



Fonte: Adaptado de GUIDICINI; NIEBLE (1983).

### 2.2.7 Mitigação de processos erosivos em margens de reservatórios

A especificação de soluções técnicas construtivas para o controle de processos erosivos gerados por ação das ondas em reservatórios deve ser precedida da compreensão da magnitude do fenômeno, o qual tem sido o esforço conjunto de inúmeros profissionais da área da engenharia nas últimas décadas (CHU, 1992).

As soluções técnicas usualmente adotadas pela engenharia civil para o controle destes efeitos adversos são *rip-rap* (enrocamento), elementos pré-moldados em concreto, gabiões, colchão-reno, paliçadas, bolsas de solo-cimento ou de concreto, *crib-wall*, geomantas ou geocélulas, além do uso de produtos para reforço superficial do solo (CHU, 1992; GOOD, 1992; JUHLE; ALLEN, 1992; NRCS, 2014; PORTER, 1992; SALES et al., 2017).

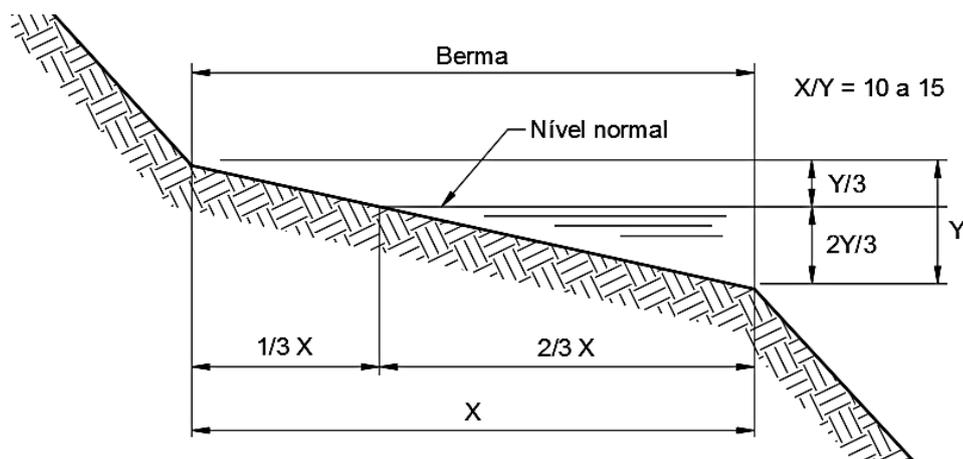
No entanto, estas técnicas são muito dispendiosas e muitas vezes não resolvem tecnicamente o problema. Quando o fazem, geralmente se dá de forma temporária seguido da necessidade de manutenção obrigatória para que as estruturas possam cumprir as funções técnicas para as quais foram projetadas (COPPIN; RICHARDS, 2007; FERNANDES; FREITAS, 2011; MAFFRA; SUTILI, 2017).

Algumas medidas alternativas de intervenção (mais baratas e adequadas ambiental e esteticamente) que podem e que estão sendo adotadas são as técnicas de Engenharia Natural (*Soil Bioengineering*, *Ingenieurbiologie*, Bioengenharia de Solos) (CHU, 1992; GOLDSMITH, 1992; JUHLE; ALLEN, 1992; SOUSA et al., 2018; SUTILI et al., 2017).

Com o nível da água do reservatório abaixo da cota máxima e parte da plataforma de abrasão exposta, estas técnicas podem ser implantadas por meio do uso de espécies vegetais adequadas que contribuam para o controle da erosão. Esta prática já vem sendo adotada em grandes reservatórios nos Estados Unidos (REID, 1992) e recentemente também no Brasil (SOUSA et al., 2018; SUTILI et al., 2017).

Em cada faixa de intervenção devem ser implantadas espécies vegetais adaptadas às diferentes condições de submersão impostas pela oscilação do nível de água do reservatório, de modo a conferir uma cobertura vegetal e estabilização duradoura à margem tratada. A faixa ideal de intervenção (comprimento “X”) pode ser determinada matematicamente com base no nível normal da água, conforme representação esquemática apresentada na Figura 17.

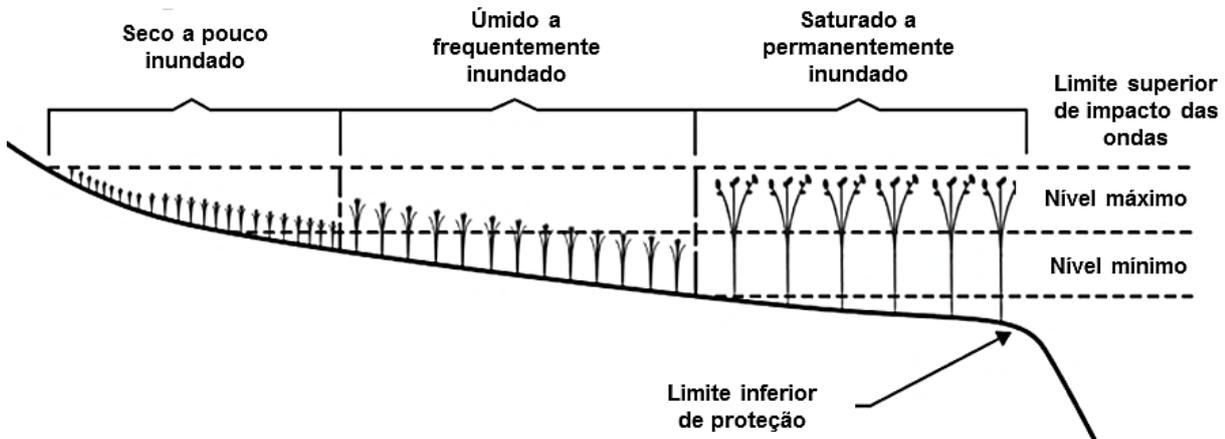
Figura 17 – Representação esquemática da margem do reservatório com delimitação das faixas do terreno a serem intervencionadas.



Fonte: Adaptado de NRCS (2014).

A divisão esquemática da faixa de intervenção com o tipo ideal de espécies vegetais a serem utilizadas para cada regime de inundação pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Representação esquemática com divisão da margem em faixas de intervenção definidas com base no regime de inundação.



Fonte: Adaptado de NRCS (2014).

Outra medida técnica indireta e complementar que vem sendo adotada nos Estados Unidos é a manutenção do nível de água do reservatório abaixo da cota máxima. Esta prática diminui drasticamente as taxas de erosão, uma vez que as maiores perdas de solo e recuos da margem ocorrem quando o nível encontra-se na cota máxima, ou seja, quando as ondas colidem frontalmente contra o talude vertical (LYONS; HARRIS, 1992; REID, 1992).

### 2.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DIRETO DE EROSÕES

A erosão natural é um processo que atua de forma lenta, mas contínua, sobre a superfície terrestre (DURLO; SUTILI, 2014), o que pressupõe que seus efeitos devam ser monitorados nos diferentes segmentos da paisagem como em rios, reservatórios, lagos, região costeira, entre outros (GATTO, 1988).

O monitoramento de erosões e transformação da paisagem em âmbito fluvial ganhou força a partir de 1950 através de estudos pioneiros desenvolvidos por geólogos e geomorfólogos ingleses e americanos. Alguns dos métodos de medição desenvolvidos por estes especialistas foram adaptados e implementados em rios e reservatórios brasileiros a partir da década de 90 (CORREA; FILHO, 2009; FERNANDEZ, 1996).

Os métodos de monitoramento que serão apresentados na sequência podem ser utilizados no estudo de mudança da paisagem, nomeadamente na ocorrência de

erosões em diferentes ambientes (rios, lagos, etc), sendo ferramentas úteis para a avaliação do impacto dos processos erosivos, bem como para auxiliar a tomada de decisões.

Os métodos quantitativos de monitoramento mais frequentemente utilizados são o método dos pinos, o método das estacas e o método das perfilagens sucessivas (BORGES, 2004; CORREA; FILHO, 2009).

Os métodos qualitativos (medições indiretas) também são utilizados no estudo de erosões e modificação da paisagem, ressalvadas suas particularidades, condições de aplicação e objetivos do estudo. Estes métodos consistem na comparação de mapas e fotografias históricas (GUY, 1981; LAWLER, 1993a; LEWIN, 1972; MACFALL; ROBINETTE; WELCH, 2014; SAINT-LAURENT et al., 2001; THORNE, 1981) considerando um período de 10 a 20 anos (HOOKE, 1980), datação de carbono catorze ( $C^{14}$ ) (CORREA; SOUZA FILHO, 2009) considerando um período de 30 a 500 anos (HOOKE, 1980), técnicas fotogramétricas, imagens de vídeo e mapas topográficos plani-altimétricos (BARTLEY et al., 2006; GATTO, 1988).

Tendo em vista o nível de detalhamento e precisão exigido no levantamento de dados a campo, os métodos qualitativos de monitoramento de erosões não serão aprofundados neste trabalho.

### **2.3.1 Método dos pinos**

O método dos pinos é a técnica mais difundida e empregada quando se pretende avaliar perdas de solo em taludes de rios, reservatórios e lagos. Esta técnica, que foi implementada e descrita primeiramente por Wolman (1959), é frequentemente utilizada para o monitoramento de erosões em taludes fluviais tanto no Brasil (BORGES, 2004; CASADO et al., 2002; CORREA; FILHO, 2009; FERNANDEZ; FULFARO, 1993; JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013; SILVA et al., 2007, 2012; SOUZA; CUNHA, 2007) como no exterior (BARTLEY et al., 2006; BRADBURY et al., 1995; BULL, 1997; COUPER; STOTT; MADDOCK, 2002; CURRAN, 2001; HAIGH, 1977; HOOKE, 1980; HUDSON, 1982; HUPP et al., 2009; LAWLER, 1993a, 1993b; LAWLER et al., 1999; LEOPOLD; EMMETT; MYRICK, 1966; POPE; ODHIAMBO, 2014; SCHENK et al., 2010; THORNE, 1981; THORNE;

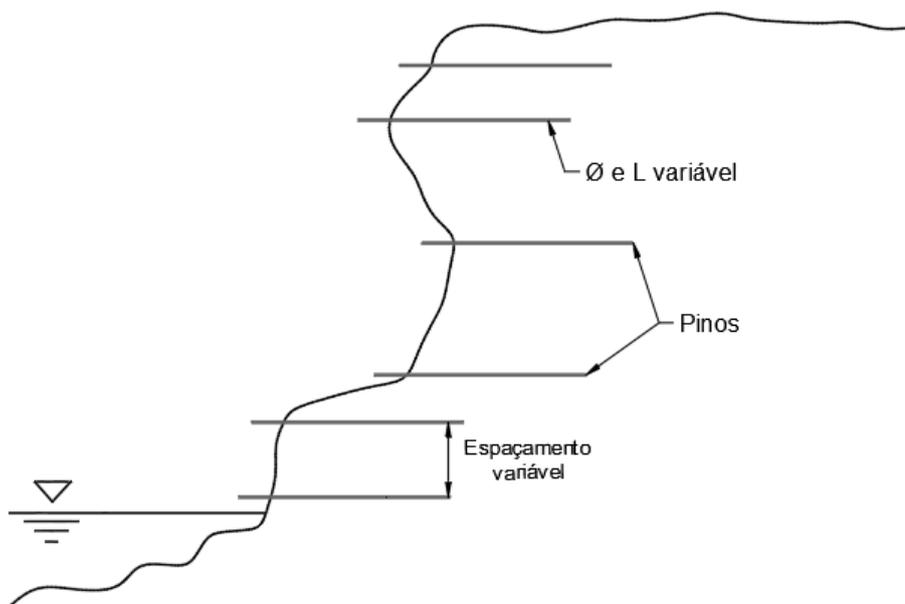
TOVEY, 1981; WOLMAN, 1959), bem como em margens de reservatórios de água (embora menos frequentemente) (ELLIOTT, 1991; FERNANDEZ; FULFARO, 2000; GATTO, 1988; REID, 1984).

O método dos pinos de erosão consiste na cravação manual de pilotos na face vertical dos taludes, mantendo uma porção do comprimento total dos pilotos exposta, de modo que o recuo da margem possa ser mensurado a partir de campanhas de medição sucessivas (BRADBURY et al., 1995; CORREA; FILHO, 2009; CURRAN, 2001; GATTO, 1988; HAIGH, 1977).

A representação esquemática apresentada na Figura 19 ilustra o arranjo dos pinos de erosão em um talude hipotético.

A medição da porção exposta dos pinos é realizada por meio de uma régua ou paquímetro geralmente após um evento pluviométrico intenso. Após a medição os pinos são reajustados com a ajuda de um martelo ou equipamento similar, mantendo novamente uma porção conhecida exposta para medição na próxima campanha (BARTLEY et al., 2006; FERNANDEZ, 1996; HOOKE, 1979; HUPP et al., 2009; REID, 1984).

Figura 19 – Representação esquemática do posicionamento de pinos de erosão na face vertical de um talude para acompanhamento do recuo da margem.



Fonte: O autor.

A cravação dos pinos geralmente é realizada perpendicularmente à face do talude, desde a base até o topo. A distribuição ou espaçamento dos pinos não segue um padrão estabelecido e varia de estudo para estudo (GATTO, 1988). Os fatores que geralmente são considerados para determinar a disposição e o espaçamento dos pinos é a altura do talude e a existência de diferentes camadas texturais de solo (JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013). O Quadro 1 apresenta detalhes do arranjo dos pinos nos taludes para alguns trabalhos realizados.

O aumento da exposição dos pinos entre campanhas sucessivas de medição representa a evolução (recuo) da margem, podendo-se valer desta medida para a estimativa do volume de solo erodido (BORGES, 2004; COUPER; STOTT; MADDOCK, 2002). A magnitude da erosão ocasionada entre campanhas sucessivas pode ser calculada da seguinte forma (FERNANDEZ, 1996):

$$E_m = \frac{(L_1 - L_o)}{t} \quad (3)$$

em que:

$E_m$  = é a magnitude da erosão (cm/mês);

$L_1$  = é o comprimento do pino exposto (cm);

$L_o$  = é o comprimento inicial do pino exposto (cm);

$t$  = é o tempo entre campanhas sucessivas (meses).

Quadro 1 – Espaçamento vertical (V) e horizontal (H) adotado entre pinos de erosão e comprimento do trecho monitorado em algumas pesquisas realizadas.

Autores	Espaçamento (m) (V:H)	Trecho monitorado (m)
Casado et al. (2002)	variável : 3,0	3,0
Couper et al. (2002)	0,1 : 1,0	8,0
Hooke (1979)	0,3 : 3	3,0
Souza et al. (2012)	0,2 : 0,5	3,0
Wolman (1959)	variável : 1,5	-
Leopold et al. (1966)	variável : 15,2	-

Fonte: O autor.

O período total de monitoramento também varia de estudo para estudo. A recomendação é que este período seja de cinco a dez anos, de modo que a dinâmica e o comportamento dos processos erosivos possam ser devidamente compreendidos (HOOKE, 1979). Todavia, a maioria dos estudos encontrados na literatura adota um período de avaliação de até dois anos, ou menos.

A frequência de revisita do local para medição da porção exposta dos pinos varia muito, não havendo uma periodicidade estabelecida e padronizada. As medições podem ser realizadas semanalmente, mensalmente, semestralmente, logo após eventos intensos de chuva, entre outros, a depender das características dos taludes em estudo e das condições hidrológicas e hidráulicas do local.

De modo geral, a frequência de medição dos pinos de erosão está diretamente ligada à velocidade de evolução das margens monitoradas. Quando o recuo das margens é acelerado, as campanhas de medição com os devidos ajustes dos pinos necessitam ser realizadas com grande frequência, de modo que os pinos não sejam perdidos. Quando o recuo for superior a 0,80 m/mês como, por exemplo, em rios tropicais caudalosos, o método dos pinos não apresenta resultados satisfatórios, devendo-se optar pelo método das estacas ou a conjugação de vários métodos (FONTES, 2003 apud BORGES, 2004; SOUZA; CUNHA, 2007).

Os pinos de erosão são geralmente confeccionados de aço, podendo ser outro tipo de material, e apresentam diâmetros e comprimentos variados a depender das condições e objetivos de cada estudo. O diâmetro dos pinos varia entre 1,0 e 13,0 mm e o comprimento varia entre 0,10 e 1,22 m (FERNANDEZ, 1996; HOOKE, 1979; LAWLER, 1993a; POPE; ODHIAMBO, 2014).

As grandes vantagens do uso deste método é a sua simplicidade, facilidade e baixo custo de implantação, aliado à flexibilidade de monitoramento de taludes de diferentes fisionomias (LAWLER, 1993b; RUBIO, 2014). A precisão obtida nas medições periódicas dos pinos permite uma boa estimativa da quantidade de solo erodido (THORNE, 1981). No entanto, o método apresenta algumas desvantagens e limitações, como exemplificado a seguir.

O Quadro 2 apresenta o tipo de material de confecção dos pinos e as dimensões usualmente adotadas por alguns pesquisadores.

Quadro 2 – Tipo de material frequentemente utilizado na confecção dos pinos de erosão e respectivas dimensões (diâmetro e comprimento) adotadas em alguns estudos.

Autores	Material	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)
Bradbury et al. (1995)	Aço	10,0	1,00
Casado et al. (2002)	Aço	6,0	1,00
Couper et al. (2002)	Silicone	3,2	0,33
Hooke (1979)	Aço	6,35	0,40 – 0,80
Lawler et al. (1999)	Silicone	1,0 – 4,0	0,37
Leopold et al. (1966)	Aço	13,0	0,25
Pope; Odhiambo (2014)	Aço	10,0	0,71 – 1,22
Souza et al. (2012)	Aço	-	-
Wolman (1959)	Aço	6,4	0,30

Fonte: O autor.

Movimentação dos pinos: o método assume que os pilotos utilizados permaneçam imóveis dentro do talude (COUPER; STOTT; MADDOCK, 2002). Todavia, a perda total de pinos devido a deslizamentos em taludes submetidos a processos de solapamento e corrosão da base é relatada com frequência pelos pesquisadores (BARTLEY et al., 2006; BORGES, 2004; FERNANDEZ, 1996; HOOKE, 1979; HUDSON, 1982; REID, 1984; SOUZA; CUNHA, 2007). O processo de instabilização também é influenciado por camadas de material grosseiro de depósitos antigos depositados na base do talude, os quais são facilmente removidos pelo fluxo da água durante eventos pluviométricos intensos (CASADO et al., 2002) ou por ondas geradas por embarcações (BORGES, 2004).

A ocorrência de deslizamentos em estudos com pinos de erosão é observada com maior frequência em solos arenosos e siltsos, cujos materiais não apresentam coesão (CASADO et al., 2002; SILVA et al., 2012). Para evitar este tipo de problema devem ser usados pinos de 0,8 m de comprimento (HOOKE, 1979).

Para Hooke (1979), o método dos pinos mostra-se adequado para o monitoramento de taludes constituídos de material siltsoso, sendo pouco adequado para material grosseiro (pedregulhos, seixos, etc). Solos com presença de material grosseiro são difíceis de monitorar devido à dificuldade de cravação dos pinos e na

medição exata do comprimento de pino exposto em função das irregularidades da superfície (FERNANDEZ, 1996; THORNE, 1981).

Outro problema deste método é observado em taludes que apresentam movimentos lentos (*creep*), os quais tendem a arquear ou movimentar os pinos inseridos dentro do solo (FERNANDEZ, 1996), o que pode resultar em imprecisões na medição da quantidade real de solo perdido.

Outra forma que pode ocasionar a movimentação dos pinos é o efeito da pressão hidrostática da água dentro do maciço de solo. Este efeito ocorre durante o período de inverno quando há o congelamento da água, que por sua vez exerce pressão sobre a base e superfície do pino, empurrando-o para fora do talude. Este fenômeno pode gerar uma superestimativa do volume real de solo perdido para cada pino (HAIGH, 1977; HUDSON, 1982). Todavia, este efeito é mais intenso em países que apresentam quedas severas de temperatura durante o inverno, como os observados nos países do hemisfério norte.

Mudanças na elevação da base e/ou face do talude: em alguns momentos podem ocorrer elevações do terreno pela deposição de solo erodido a montante na bacia durante cheias (BRADBURY et al., 1995). Quando a exposição inicial dos pinos for pequena, os mesmos podem ser soterrados, dificultando a medição precisa das mudanças ocorridas do local na próxima campanha de campo (HAIGH, 1977).

Influência dos pinos na erosão: o método pode influenciar de duas maneiras principais os processos erosivos instaurados, nomeadamente pela própria presença dos pinos no talude (HUDSON, 1982; LAWLER, 1978 apud COUPER et al., (BULL, 1997; LAWLER et al., 1999) 2002) e pela cravação mecânica dos mesmos (HAIGH, 1977).

À medida que os pinos vão envelhecendo, a ferrugem formada em sua superfície tende a estabelecer uma forte ligação com o solo adjacente (BRIDGES & HARDING, 1971 apud COUPER et al., 2002), formando uma estrutura resistente que pode subestimar a erosão atuantes. Todavia, este efeito pode ser evitado através do uso de pinos de silicone (BULL, 1997; LAWLER et al., 1999).

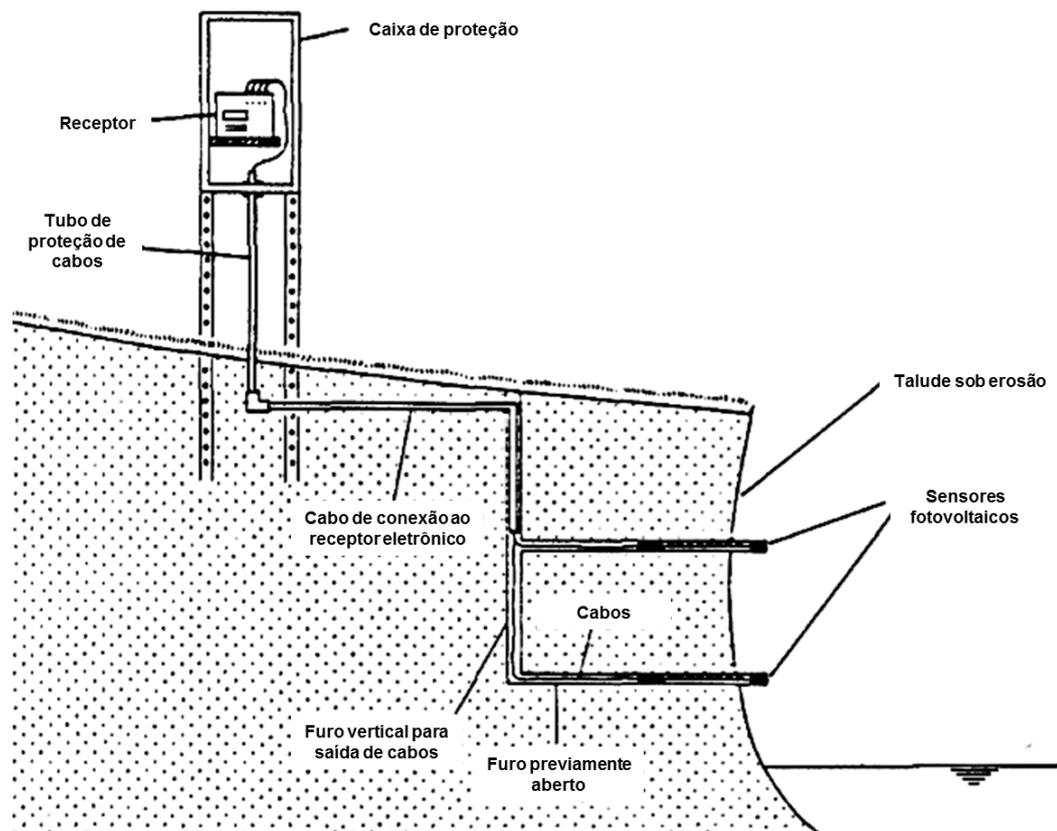
Os pinos também são entendidos como um elemento estrutural presente no solo, o qual pode aumentar a resistência ao cisalhamento de maciços argilosos e influenciar as taxas de erosão. Para evitar este tipo de efeito recomenda-se que os pinos devem possuir entre 0,3 e 0,5 m de comprimento (THORNE, 1981).

O ajuste dos pinos por cravação mecânica durante as campanhas de medição para correção do comprimento exposto pode causar alteração que influencia a dinâmica dos processos erosivos (LAWLER et al., 1999). A presença de pinos na face do talude pode ainda alterar as condições hidráulicas do fluxo na sua superfície por meio de turbilhonamento e possíveis aumentos das taxas de erosão próximo dos pinos (LAWLER, 1978 apud COUPER et al., 2002).

Interferência humana: a principal forma de interferência humana é a alteração intencional (vandalismo) das condições estáticas relacionadas aos pinos e ao talude. Isto inclui o arranquio, dobra ou inserção dos pinos no talude e/ou a indução de deslizamentos com consequente perda total dos pinos (HAIGH, 1977).

Um método similar, embora mais sofisticado, foi desenvolvido por Lawler; Leeks (1992) e denominado PEEP (*Photo-Electronic Erosion Pin*) (Figura 20).

Figura 20 – Representação esquemática do método PEEP (*Photo-Electronic Erosion Pin*) instalado próximo a uma margem fluvial para medição da erosão por meio de sensores fotovoltaicos.



Fonte: Adaptado de LAWLER; LEEKS (1992).

Este método consiste de um ou mais tubos de acrílico equipados com fileiras de células fotovoltaicas que são inseridos perpendicularmente à face do talude através de abertura prévia de um furo no maciço. À medida que o processo erosivo avança e expõe as células fotovoltaicas, estas captam a luz solar e transmitem os dados para um equipamento eletrônico específico de armazenamento instalado nas proximidades. Desta forma, este método realiza medições contínuas da perda de solo, o que dispensa campanhas periódicas de medição a campo (BULL, 1997; LAWLER, 1991; LAWLER; LEEKS, 1992).

A vantagem deste método é a razoável robustez, a facilidade de construção e instalação e a dispensa de energia elétrica para o seu funcionamento. As principais desvantagens residem no fato de que o método só pode ser instalado em taludes com material fino. A instalação, precedida da abertura de furos para a locação de tubos e cabos, pode alterar as características de resistência mecânica do maciço (LAWLER & LEEKS, 1992) e, por sua vez, influenciar a perda de solo no local.

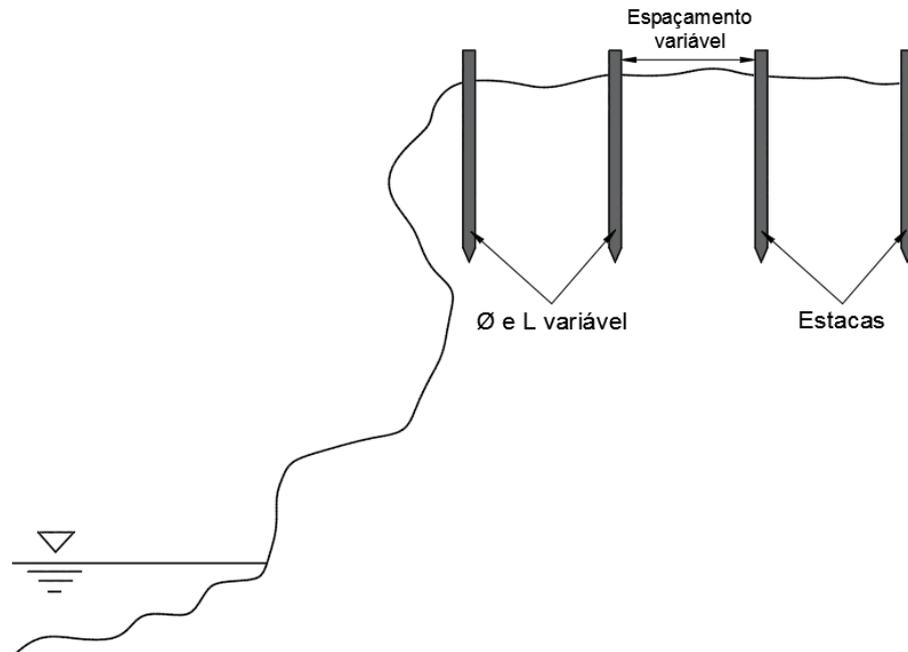
### **2.3.2 Método das estacas**

Com base na literatura técnica disponível, este método pode ser utilizado no monitoramento de erosões em taludes fluviais e de reservatórios (BORGES, 2004; ELLIOTT, 1991; FERNANDEZ; FULFARO, 1993, 2000; HAIGH, 1977; JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013; REID, 1984; SANDBERG, 1986; SILVA et al., 2007; SOUZA; CUNHA, 2007; THORNE, 1981). Todavia, pode-se dizer que este método não é tão frequentemente utilizado quanto o método dos pinos.

O método das estacas consiste na instalação de pontos de referência, que geralmente são constituídos por pilotos de madeira (BORGES, 2004; GUY, 1981; SILVA et al., 2007; WOLMAN, 1959), mas também podem ser de metal (GATTO, 1988; REID, 1984), os quais são posicionados no topo do talude. A cravação das estacas é realizada em linhas a uma distância conhecida desde a crista do talude e numa faixa com largura variável e proporcional à velocidade de recuo das margens (GATTO, 1988). Essa largura pode variar de 2 a 6 metros (faixa medida a partir da crista), enquanto que o espaçamento recomendado entre estacas na linha é de 3 m (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013).

O arranjo das estacas no topo do talude pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Representação esquemática do posicionamento de estacas de madeira no topo do talude para acompanhamento do recuo da margem.



Fonte: O autor.

As estacas são dispostas geralmente em duas ou mais linhas (com espaçamento conhecido) paralelas à margem, com o objetivo de assegurar o controle do recuo da margem em caso de perda total de estacas próximas da crista do talude causada por deslizamentos (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; JUSTINIANO; SOUZA; PIERANGELI, 2013).

Recomenda-se que cada estaca seja referenciada em relação a um marco fixo (estrutura, árvore, etc.) posicionado em terra firme, de modo que as medições de recuo da margem possam ser realizadas mesmo com uma possível perda das estacas por vandalismo ou deslizamentos (GATTO, 1988).

As estacas geralmente são confeccionadas em madeira e possuem entre 1,0 m e 1,5 m de comprimento. Após cravação no solo, cada estaca deve ser georreferenciada por meio de sistema GPS (*Global Position System*) (SILVA et al., 2007). A porção exposta das estacas geralmente é destacada com tinta acrílica, como forma de evitar acidentes com pessoas que venham a transitar na área, além de facilitar a visualização das mesmas durante as campanhas de medição (SILVA et al., 2007).

A distância entre as estacas e a margem é determinada durante cada campanha de medição, de modo que o recuo da margem dentro do período considerado possa ser mensurado (BORGES, 2004; SILVA et al., 2007).

Diferentemente do método dos pinos, este método retorna uma avaliação bastante subjetiva da magnitude dos processos erosivos atuantes na face do talude, embora o método apresente boas estimativas em taludes verticais com recuos uniformes (BORGES, 2004). No entanto, esta condição poucas vezes é encontrada na prática a campo.

Assim como no método dos pinos, a frequência de campanhas sucessivas de coleta de dados depende da velocidade de recuo da margem (GATTO, 1988). De acordo com Silva et al. (2007), o intervalo de tempo adequado entre duas medições consecutivas é de aproximadamente um mês. Recomenda-se também que as medições sejam executadas antes e imediatamente após grandes eventos pluviométricos (GUY, 1981). Portanto, não há uma regra padronizada neste sentido, já que as características dos taludes e as condições hidráulicas e hidrológicas são específicas de cada local alvo de monitoramento.

Em todo caso, este método pode ser utilizado como uma ferramenta auxiliar a outros métodos no que diz respeito ao monitoramento de taludes fluviais e lacustres que apresentem grandes evoluções anuais.

### **2.3.3 Método das perfilagens sucessivas**

A realização de perfilagens da face do talude durante as campanhas de medição a campo permite a caracterização espaço-temporal do recuo da margem em relação a um marco topográfico conhecido (BORGES, 2004; CASADO et al., 2002; CORREA; SOUZA FILHO, 2009; HUDSON, 1982).

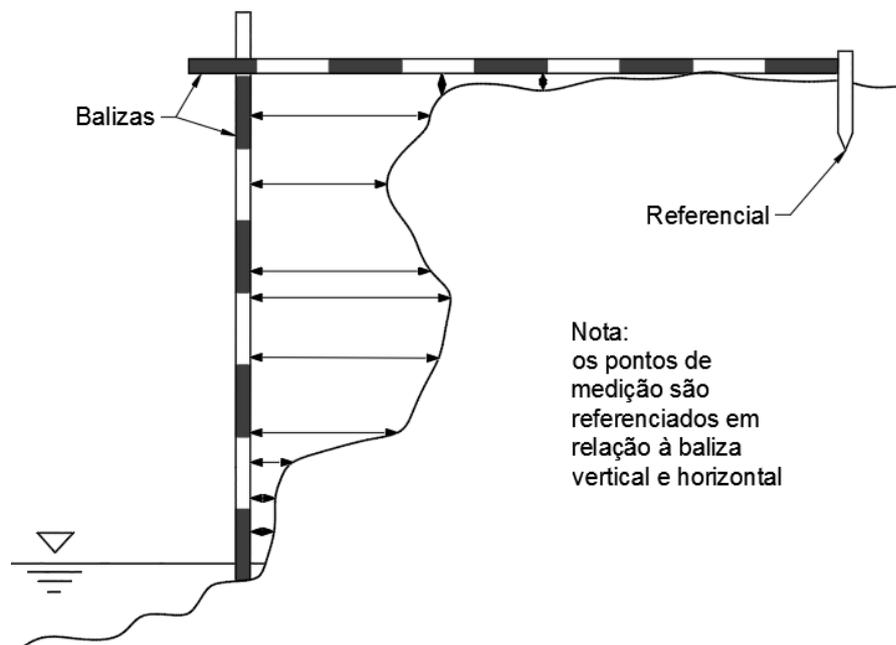
O produto resultante do método das perfilagens sucessivas é o perfil transversal do talude analisado (HUDSON, 1982). O levantamento de dados pode ser realizado por meio de réguas graduadas com comprimento variável (a depender da altura do talude) e trena métrica (CORREA; SOUZA FILHO, 2009).

A tomada de dados para representação morfológica da face do talude é realizada conforme representação esquemática apresentada na Figura 22.

A baliza horizontal é nivelada com a ajuda de um nível de mão e tem sua base referenciada em um marco fixo nas adjacências do talude (3 a 5 m da crista). A

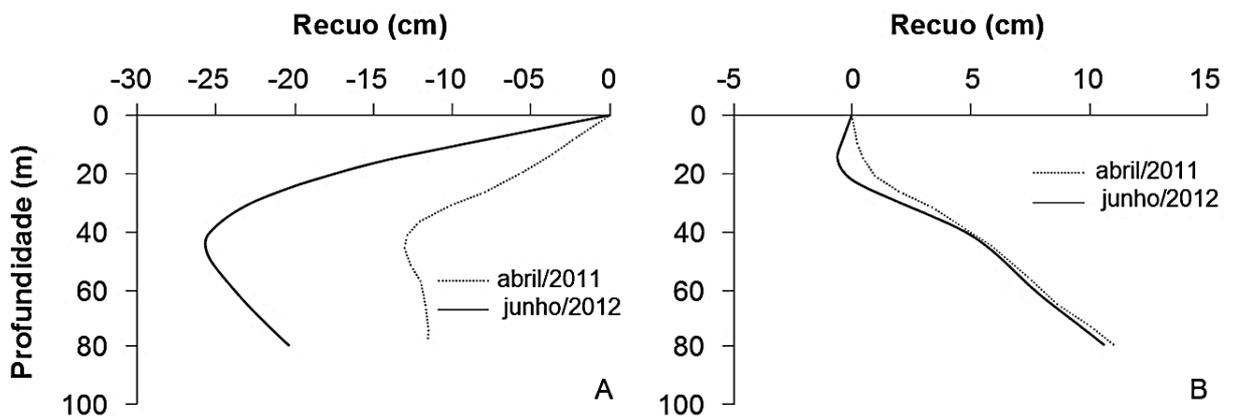
seguir posiciona-se a baliza vertical, de modo que esta intercepte a baliza horizontal formando um ângulo de  $90^\circ$ , abrangendo toda a face do talude. A seguir são obtidas distâncias horizontais espaçadas verticalmente com base na baliza vertical. O número de pontos tomados depende da complexidade do talude e da precisão desejada (HUDSON, 1982). O produto final obtido é o apresentado na Figura 23.

Figura 22 – Representação esquemática do método das perfilagens sucessivas em um talude.



Fonte: Adaptado de HUDSON (1982).

Figura 23 – Perfilagens da face do talude obtidas a partir de duas medições sucessivas. (A) margem 1 e (B) margem 2.



Fonte: (CASADO et al. 2002).

O método das perfilagens pode ser utilizado isoladamente para descrição da superfície do talude. No entanto, a combinação deste método com o método dos pinos fornece uma avaliação mais satisfatória (WOLMAN, 1959). Quando a velocidade de recuo da margem for alta, este método pode ainda ser utilizado conjuntamente com técnicas fotogramétricas (HUDSON, 1982).

A vantagem deste método é o seu baixo custo de levantamento e obtenção de dados. O levantamento deve ser realizado preferencialmente por duas pessoas para garantir uma precisão de medição de  $\pm 5$  cm (HUDSON, 1982). Com estas condições, o tempo de medição estimado de um talude de 2 m de altura é de cerca de 5 minutos (HUDSON, 1982).

Uma desvantagem deste método reside no fato de que se obtêm somente a representação da morfologia da face do talude. Para uma medição precisa da morfologia da plataforma de abrasão (reservatório e/ou rio), assim como a morfologia do terreno natural a partir da crista do talude, necessita-se conjugar este método com o método dos pinos e/ou estacas, por exemplo.

Outra limitação do método é que a altura do talude a monitorar deve ser reduzida, de modo que a tomada de dados possa ser realizada de forma correta e segura (HUDSON, 1982).

Com base no exposto acima, a escolha de um dos métodos, ou a conjugação deles, não segue especificações técnicas e deve ser realizada considerando as condições vigentes em cada local. Em relação ao canal fluvial, um aspecto importante de ser observado na escolha do método é a velocidade da água, a qual determina a capacidade erosiva do fluxo. Além disso, a evolução mais ou menos acelerada do talude ou encosta também depende das características do maciço de solo (CASADO et al., 2002). Desta forma, a escolha do(s) método(s) mais adequado(s) deve ser precedida de um estudo prévio das condições hidráulicas e do tipo de material do maciço encontrado no local a ser monitorado.

### **3 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DE EROSÕES EM RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Neste capítulo pretende-se desenvolver e apresentar uma nova metodologia para monitoramento de erosões em bordas de reservatórios. Para tal serão abordadas inicialmente as limitações técnicas e executivas dos métodos tradicionais apresentados no capítulo anterior (método dos pinos, método das estacas e método das perfilagens sucessivas). Com base nesta abordagem e nas características inerentes ao ambiente lacustre, será desenvolvida e apresentada uma metodologia especificamente para o monitoramento de erosões em bordas de reservatórios.

#### **3.1 LIMITAÇÕES TÉCNICAS DOS MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO**

As técnicas tradicionais de monitoramento de erosões (método dos pinos, métodos das estacas e método das perfilagens sucessivas) descritas no Capítulo 2 consistem em métodos de medição direta a campo. Estes métodos são frequentemente utilizados no acompanhamento de perdas de solo em taludes fluviais e na migração lateral de canais meandранtes, tanto de pequeno quanto de grande porte.

O uso dos respectivos métodos em taludes fluviais justifica-se pelo reduzido número de trechos de margens alvos de monitoramento, que geralmente estão localizados em pontos de fácil acesso. Esta condição permite visitas frequentes para realização de campanhas de medição e manutenção dos métodos instalados.

Com base na revisão bibliográfica verificou-se que as principais limitações dos métodos tradicionais de medição direta referente à qualidade dos dados e aos custos de monitoramento são os seguintes:

- Suscetibilidade de perda de unidades de medição por vandalismo;
- Suscetibilidade de perda de unidades de medição por movimentos de solo;
- Alteração das condições de resistência mecânica do talude (aumento ou redução);
- Alteração das condições hidráulicas na face do talude;

- Alterações físicas e químicas de unidades de medição por agentes ambientais;
- Manutenção constante e frequente;
- Limitação da altura do talude a monitorar;
- Grande quantidade de mão de obra necessária por campanha de medição;
- Grande quantidade de tempo de medição de cada ponto monitorado;
- Grande quantidade de materiais e equipamentos de medição;
- Ausência de normas e especificações de medição padronizadas;
- Monitoramento de um único segmento do terreno por cada método;
- Necessidade de conjugação de métodos para medições precisas;
- Processamento dispendioso dos dados.

Muitas das limitações técnicas elencadas acima podem afetar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos, bem como onerar o processo de monitoramento.

Considerando a especificidade e dinâmica lacustre, os métodos apresentados não atendem com eficiência às necessidades de monitoramento deste tipo de ambiente em larga escala. Desta forma, fica explícita a demanda por uma metodologia de medição que contemple e leve em consideração os seguintes requisitos:

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

Com base nestes requisitos pretende-se apresentar a seguir uma nova metodologia direta de monitoramento de processos erosivos de ocorrência em bordas de reservatórios de água, especificamente de usinas hidrelétricas.

### 3.2 PROPOSTA DE METODOLOGIA DE MONITORAMENTO DIRETO A CAMPO

Esta proposta de metodologia engloba três etapas a serem executadas durante o processo de monitoramento. Estas etapas são denominadas de planejamento inicial, monitoramento topográfico e análise de dados. Cada etapa contempla atividades específicas que devem ser realizadas de forma sequencial e cronológica. O Quadro 3 e a Figura 44 apresentam estas três etapas e as respectivas atividades envolvidas em cada uma delas.

Quadro 3 – Etapas básicas e respectivas atividades a serem realizadas durante o processo de monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de água.

ETAPAS	ATIVIDADES
PLANEJAMENTO INICIAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Visita técnica de reconhecimento</li> <li>➤ Planejamento de escritório</li> </ul>
MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Planejamento logístico</li> <li>➤ Instalação de seções topográficas</li> </ul>
ANÁLISE DE DADOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Processamento de dados</li> <li>➤ Análise de seções topográficas</li> </ul>

Fonte: O autor.

Cada atividade elencada prevê tarefas relacionadas à metodologia de monitoramento proposta, as quais serão devidamente descritas na sequência.

#### 3.2.1 Planejamento inicial

A etapa de planejamento inicial do monitoramento de erosões consiste na execução das atividades de visita técnica de reconhecimento e de planejamento de

escritório. Em cada atividade estão previstas a execução de tarefas, as quais serão descritas detalhadamente a seguir. Ao término da descrição relativa ao planejamento inicial é apresentado um fluxograma na Figura 25 que reúne todas as atividades e tarefas descritas.

### *3.2.1.1 Visita técnica de reconhecimento*

A visita técnica ao reservatório e aos futuros locais a serem alvos de monitoramento é a primeira atividade a ser executada e é absolutamente necessária ao planejamento posterior em escritório. Esta atividade específica compreende as ações de identificação, descrição e levantamento fotográfico de trechos com erosão.

#### 1. Identificação de trechos com erosão

A identificação de trechos deve ser executada percorrendo todo o perímetro do reservatório de água via lacustre por meio de barco náutico motorizado com condutor devidamente habilitado.

Os reservatórios de usinas hidrelétricas caracterizam-se geralmente por apresentar uma grande extensão e área superficial e, portanto, englobam diferentes fisionomias de encostas ao longo de todo o perímetro. Estas fisionomias englobam diferentes tipos de solos que vão desde solos com perfis morfológicos bem desenvolvidos, solos de material grosseiro com presença de cascalhos e/ou blocos de pedra, até imensos maciços rochosos. As diferentes propriedades físicas e mecânicas destes materiais influenciam a magnitude dos processos erosivos deflagrados em diferentes pontos do reservatório. Com isso, trechos de margens que apresentem maciços ou paredes rochosas não sofrerão erosão pela influência do reservatório comparado com margens que possuam solos granulares mais ou menos coesivos.

Assim sendo, a vistoria de todo o perímetro do reservatório objetiva reconhecer e delimitar geograficamente os trechos de margens que apresentem perdas visíveis de solo, de modo que possam ser alvo de monitoramento posterior.

Os critérios que podem ser considerados na identificação de trechos com erosão são a altura do talude superior, a ocorrência visível de perda de solo recente

na forma de pequenos deslizamentos ou tombamentos e a ausência completa de vegetação nos taludes superior e inferior.

A delimitação geográfica dos trechos com erosão pode ser realizada a campo por meio de um sistema GPS de navegação. Para tal devem ser coletadas coordenadas geográficas (X, Y) do ponto de início e final do trecho em questão. As coordenadas podem ser tomadas a partir do barco transitando próximo da margem.

As coordenadas geográficas coletadas em todos os trechos podem ser posteriormente descarregadas no aplicativo *Google Earth Pro*<sup>®</sup>. Com o auxílio desta ferramenta poderá ser determinado o comprimento de cada trecho com erosão, a análise da distribuição espacial dos trechos no reservatório, o planejamento logístico das próximas etapas, entre outros usos e aplicações.

## 2. Descrição de trechos com erosão

A descrição dos trechos com erosão deve ser realizada durante a visita a cada local. Esta tarefa consiste no levantamento de informações complementares acerca das características e condições atuais de cada trecho.

Alguns aspectos de interesse técnico a serem observados são a cobertura superficial dos taludes (vegetação arbórea, capoeira, pastagem, presença de materiais inertes diversos, etc), 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).

Os aspectos sociais a serem observados são perda de áreas destinadas ao aproveitamento recreativo, econômico e/ou produtivo, a incidência (ou não) de impacto visual em áreas públicas, bem como o risco ou suscetibilidade de causar danos a obras de infraestrutura e/ou edificações. O Apêndice A apresenta estes aspectos (técnicos e sociais) de forma mais detalhada em formato de ficha técnica, a qual pode servir de roteiro para o levantamento rápido de informações a campo.

## 3. Levantamento fotográfico

O registro fotográfico de cada trecho com erosão pode ser realizado a partir do barco, enquanto o mesmo transita próximo e ao longo da margem afetada. É

aconselhada a tomada de grande quantidade de fotografias em diferentes perspectivas, de modo que as fotografias retratem, de forma mais clara possível, a fisionomia e particularidades de cada local.

O registro fotográfico é realizado concomitantemente à descrição de cada trecho através de ficha técnica de campo, conforme detalhado no tópico anterior. Ele é importante, pois permitirá a complementação posterior em escritório das informações obtidas pela ficha técnica de campo, que porventura tenham sido negligenciadas involuntariamente durante a visita de reconhecimento.

Nas etapas subsequentes, o registro fotográfico também auxiliará na comparação qualitativa de diferentes áreas com erosão. Outra função importante é auxiliar na delimitação de subtrechos com características morfológicas similares e na seleção de pontos representativos de cada subtrecho para instalação de seções topográficas de monitoramento.

Os aspectos relativos às seções topográficas serão abordados em maiores detalhes no item 3.2.2.2.

### *3.2.1.2 Planejamento de escritório*

A visita técnica de reconhecimento e o levantamento preliminar de informações a campo será sucedida por atividades de escritório. Nesta fase serão organizadas e analisadas as informações coletadas na fase anterior, especificamente a delimitação de subtrechos com fisionomias similares, a escolha de pontos topográficos representativos de cada subtrecho e a locação propriamente dita das seções topográficas de monitoramento. Estas três tarefas serão detalhadas na sequência.

#### 1. Delimitação de subtrechos

Os trechos de margem delimitados com ocorrência visível de perdas de solo durante a visita de reconhecimento poderão apresentar diferentes comprimentos. Em função de características específicas como diferentes tipos de solo, geologia, relevo, ocupação e uso do solo, etc, muitos destes trechos poderão apresentar grandes comprimentos de margem, tornando-os mais propensos a apresentar

diferentes condições fisionômicas (mais de um tipo de solo, áreas com presença de pedras, taludes com alturas e inclinações variadas, dentre outros).

Quando um trecho apresentar grandes heterogeneidades quanto à sua fisionomia, o mesmo deverá ser dividido em trechos menores, ou subtrechos, de modo que desta divisão resultem fisionomias mais homogêneas, conforme pode ser observado na Figura 24. Quando o trecho apresentar características homogêneas esta divisão não é necessária.

A divisão de trechos em subtrechos é importante do ponto de vista de monitoramento dos processos erosivos. Como cada fisionomia apresenta particularidades específicas, estas podem influenciar em diferentes taxas de erosão em cada local. Portanto, deve-se procurar distinguir e monitorar separadamente subtrechos com características diferentes, para que os dados obtidos a partir do monitoramento sejam representativos de suas condições fisionômicas.

Figura 24 – Divisão de trechos com erosão em subtrechos em função de características fisionômicas distintas.



Fonte: O autor

A demarcação dos subtrechos deverá ser adicionada ao arquivo digital do programa *Google Earth Pro*<sup>®</sup> contendo a localização dos trechos com erosão. Para análises posteriores este programa poderá ser fonte de informações adicionais, dentre elas o comprimento longitudinal de margem de cada subtrecho, por exemplo.

Por vezes alguns trechos necessitariam ser divididos em um número maior de subtrechos, no entanto, isto pode não ser possível em virtude do montante de recursos financeiros disponíveis para o monitoramento. Quando este for o caso,

subtrechos menos prioritários de monitoramento poderão ser eliminados com base em reconhecimento visual, de modo a adequar o monitoramento ao orçamento disponível.

## 2. Determinação de pontos representativos

Após delimitação de subtrechos (quando for o caso), será realizada a análise e escolha de pontos que representem a sua fisionomia da forma mais significativa possível. Esta representatividade fisionômica refere-se principalmente à altura do talude superior e às condições de solo de cada subtrecho.

A escolha desses pontos é importante, pois consiste na definição dos pontos de locação das seções topográficas de monitoramento, a partir das quais acompanhar-se-á os processos erosivos atuantes em cada local.

A execução desta tarefa é demorada, tendo em vista a grande extensão de margens passíveis de monitoramento ao longo de um reservatório. Mesmo assim, o técnico responsável deve ser paciente e cuidadoso na determinação destes pontos, uma vez que o acompanhamento adequado dos processos erosivos pode estar vinculado diretamente à sua representatividade.

As ferramentas e subsídios que podem ser utilizados na determinação dos pontos representativos são os registros fotográficos, bem como imagens aéreas ou orbitais de alta resolução espacial abrangendo os trechos e/ou subtrechos em questão.

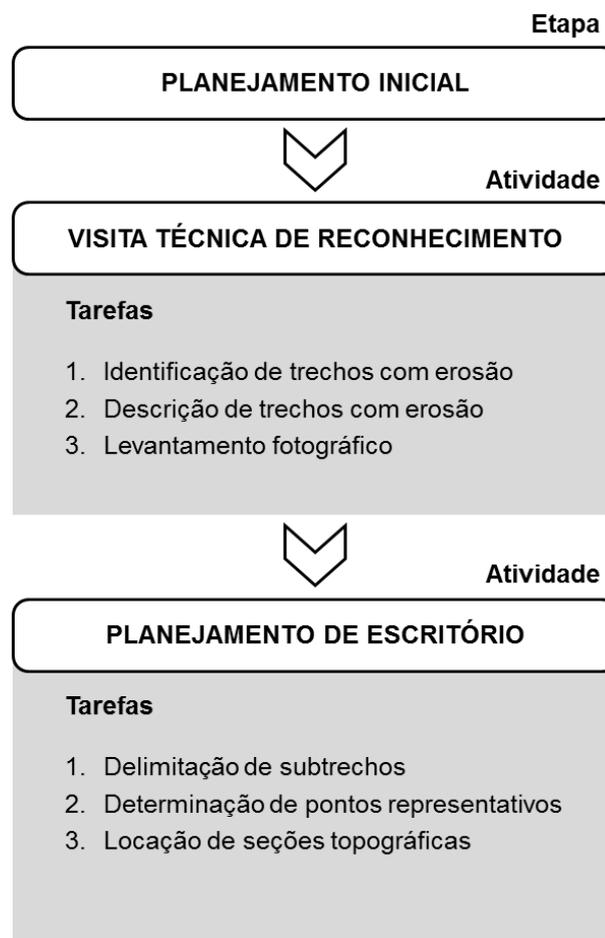
## 3. Locação de seções topográficas

Esta tarefa consiste na obtenção de uma coordenada geográfica de localização (X, Y) do ponto no talude a ser monitorado. Esta coordenada geográfica coincide com o(s) ponto(s) representativo(s) determinado(s) para cada trecho ou subtrecho no item anterior. Em cada uma destas coordenadas será instalada uma seção topográfica para monitoramento dos processos erosivos. O procedimento de instalação das seções topográficas será descrito em detalhe no item 3.2.2.2.

A coleta e o armazenamento destas coordenadas geográficas para todos os trechos alvos de monitoramento podem ser realizados com o uso do programa *Google Earth Pro*<sup>®</sup>. No mesmo arquivo que contém a localização dos trechos e

subtrechos com erosão poderão ser adicionadas as coordenadas dos pontos representativos de cada subtrecho. Ao final poderá ser gerado um arquivo digital (em formato .kmz) e disponibilizado ao técnico responsável pelo monitoramento, o qual poderá transferir os dados para um sistema GPS de navegação. Estes dados são imprescindíveis para a localização dos pontos para instalação das seções topográficas, otimizando o tempo e os custos de levantamento de dados.

Figura 25 – Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de planejamento inicial do monitoramento de processos erosivos.



Fonte: O autor.

### 3.2.2 Monitoramento topográfico

A etapa de monitoramento topográfico prevê a execução das atividades de planejamento logístico e instalação de seções topográficas. Em cada atividade estão

previstas a execução de tarefas, as quais serão descritas detalhadamente a seguir. Ao término da descrição relativa ao monitoramento topográfico é apresentado um fluxograma na Figura 38 que reúne todas as atividades e tarefas descritas.

### *3.2.2.1 Planejamento logístico*

O planejamento logístico está vinculado ao monitoramento topográfico e a coleta de dados a campo e deve ser realizado pela empresa ou instituição responsável pelo monitoramento das margens. Esta tarefa é de fundamental importância para a otimização de recursos humanos e financeiros, bem como de materiais e equipamentos necessários durante as campanhas de monitoramento.

Especificamente, nesta atividade deverá ser realizado o planejamento logístico diário, o dimensionamento da equipe de trabalho e dos equipamentos e materiais necessários. Todos estes tópicos serão tratados em maiores detalhes na sequência.

#### 1. Planejamento logístico diário

O planejamento detalhado da logística de campo é imprescindível quando se objetiva monitorar um grande número de pontos em todo o reservatório, os quais demandam vários dias de trabalho.

Do ponto de vista prático, este planejamento detalhado torna-se especialmente importante quando o número total de pontos topográficos a serem monitorados for elevado e o reservatório apresentar grande extensão.

O planejamento logístico diário deve abranger a análise dos dados de localização geográfica das seções topográficas, dos pontos de acesso ao reservatório (portos) e da localização dos marcos da Rede de Vértices Geodésicos (RVG) distribuídos ao longo do reservatório. A partir da análise conjunta destes dados deverá ser realizado o planejamento detalhado das atividades diárias de levantamento de dados.

A localização geográfica de todas as seções topográficas a serem implantadas deve ser disponibilizada pelo técnico responsável do planejamento de escritório. Conforme descrito no item 3.2.1.2, o produto que deverá ser fornecido ao responsável pela coleta de dados é um arquivo digital (localização dos trechos,

subtrechos e seções topográficas) em formato .kmz. A partir deste arquivo o executor de campo poderá analisar a distribuição espacial das seções topográficas em todo o reservatório, e a partir destas informações, planejar as atividades subsequentes.

Após análise da distribuição espacial das seções topográficas deverá ser realizado um levantamento e identificação dos prováveis pontos de acesso ao reservatório. Estes pontos de acesso podem ser pequenos portos náuticos, que permitam o acesso ao reservatório para o lançamento de barco náutico, conforme pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Lançamento de barco náutico em um ponto de acesso ao reservatório.



Fonte: O autor.

A localização destes pontos de acesso pode ser obtida diretamente com a empresa operadora do empreendimento hidrelétrico, tendo em vista o conhecimento do entorno do reservatório devido à realização de campanhas rotineiras de fiscalização.

O número de portos e as suas respectivas localizações estarão diretamente dependentes da distribuição espacial das seções topográficas. De modo geral, as seções topográficas geralmente encontram-se distribuídas de forma regular ao longo

das duas margens do reservatório. Desta forma, geralmente são necessários vários pontos de acesso posicionados estrategicamente ao longo do reservatório.

O planejamento logístico pode-se valer de programas como o *Google Earth Pro*<sup>®</sup> para o estudo de rotas viárias e identificação de novos pontos, para diminuir o tempo de acesso aos locais de monitoramento.

O deslocamento via terrestre (carro com reboque do barco) permite um acesso mais rápido aos pontos de monitoramento, comparativamente ao deslocamento exclusivamente via lacustre (barco), principalmente em grandes reservatórios de água. Esta justificativa é uma das mais importantes em relação à identificação de vários pontos de acesso ao longo do reservatório, quando for o caso, pois a análise cuidadosa deste aspecto pode aumentar o rendimento e minimizar os custos da coleta de dados a campo.

A última atividade de obtenção de informações básicas consiste na identificação dos marcos da RVG instalada ao longo das margens do reservatório ou nas suas proximidades.

Os marcos da RVG são estruturas fixas e permanentes no terreno, confeccionados em concreto, e possuem coordenadas geográficas (X, Y) e altimétricas conhecidas. A Figura 27 apresenta um marco da RVG posicionado nas margens de um reservatório.

Figura 27 – Rede de Vértices Geodésicos (RVG). (A) vista parcial de um marco da RVG posicionado nas margens de um reservatório com devida identificação e (B) transporte de coordenadas geográficas e cota altimétrica a partir de um marco de RVG para trabalhos de nivelamento e topografia em geral.



Na posse das coordenadas geográficas de localização dos pontos de acesso ao reservatório, bem como dos marcos da RVG localizados em seu entorno, podem-se adicionar estas coordenadas ao arquivo digital .kmz (*Google Earth Pro*<sup>®</sup>) que já contém a localização geográfica das seções topográficas (item 3.2.1.2) a serem implantadas. A partir deste arquivo poderá ser realizada a análise integrada dos dados de localização e, com base na estratégia de levantamento e no rendimento diário esperado, definir o quantitativo de seções diárias a monitorar, bem como o sentido do levantamento (de montante para jusante no reservatório, por exemplo).

## 2. Materiais auxiliares de levantamento

Os materiais elencados a seguir dizem respeito às atividades de deslocamento e implantação de seções topográficas nas margens do reservatório.

Desta forma, a relação de materiais imprescindíveis para o levantamento é:

- **Barco náutico motorizado** com capacidade de transporte de 3 a 5 pessoas e com coletes salva-vidas. O barco deverá ser rebocado e transportado por via terrestre com o auxílio de um veículo automotivo com tração dianteira e traseira. O barqueiro responsável deverá estar devidamente habilitado, conforme regras específicas de navegabilidade da Autoridade Marítima;
- **Estacas de madeira** de identificação das seções topográficas a campo. As estacas podem ser pintadas com tinta óleo ou outra similar, de modo a facilitar a visualização nas campanhas sucessivas de monitoramento. Cada estaca deve ser identificada conforme padrão de nomenclatura predefinido para as seções topográficas;
- **Piquetes de madeira** com marcação (prego) para materialização das seções topográficas e transporte inicial de coordenadas geográficas e cota a partir de marco da RVG;
- **Marreta** para cravação dos piquetes e das estacas de madeira;
- **Foice e/ou facão** para limpeza prévia de uma pequena faixa do terreno natural, quando for o caso, para facilitar a coleta de dados.

A Figura 28 apresenta os materiais auxiliares necessários em maiores detalhes.

Figura 28 – Materiais auxiliares necessários para o levantamento de dados a campo. (A) barco náutico motorizado com coletes salva-vidas; (B) estacas de madeira para identificação das seções topográficas; (C) piquete de madeira com marcação no topo para transporte de coordenadas e cota (posicionado ao lado da estaca em madeira) e (D) ferramentas auxiliares de limpeza da faixa de coleta de dados no terreno natural.



Fonte: O autor.

### 3. Equipamentos de levantamento de dados

- **Sistema GPS de navegação** com as coordenadas geográficas dos locais de instalação das seções topográficas, dos marcos da RVG e dos pontos de acesso (portos) distribuídos ao longo do reservatório. Todas estas informações foram obtidas e reunidas nas atividades de planejamento de escritório e planejamento logístico descritas nos itens 3.2.1.2 e 3.2.2.1. O uso deste equipamento é imprescindível para viabilizar o deslocamento via lacustre entre

seções topográficas consecutivas ao longo das margens. Também permite o acesso rápido e preciso aos marcos da RVG próximos da borda do reservatório.

- **Sistema GPS RTK (*Real Time Kinematic*)** é utilizado no transporte de coordenadas geográficas e cota altimétrica a partir do marco da RVG até o local de implantação da seção de monitoramento e na coleta de pontos sobre a seção topográfica. O equipamento consiste em dois receptores (ou bases de operação), sendo que um receptor permanece estacionário (estação base) (posicionado sobre o marco da RVG) e o outro é móvel (*rover*). O receptor móvel realiza o caminhamento e o armazenamento de pontos topográficos (coordenadas X, Y e Z) obtidos sobre o terreno.
- **Estação total** pode ser utilizada complementarmente ao receptor móvel (*rover*) na coleta de pontos sobre o terreno, de modo a acelerar o levantamento de dados a campo. Neste caso será necessário um operador para o posicionamento da mira (prisma).

#### 4. Equipe de trabalho

O dimensionamento da equipe de trabalho para a coleta de dados a campo pode variar em função do número total de seções topográficas a monitorar, dos recursos financeiros e equipamentos de medição disponíveis para o levantamento, do rendimento diário desejado, das exigências técnicas da contratante, etc.

De modo geral, o tamanho adequado da equipe de levantamento é de três colaboradores por barco. Este quantitativo é necessário devido às inúmeras atividades envolvidas no levantamento de dados propriamente dito, nomeadamente a materialização e identificação das seções topográficas no terreno, a limpeza prévia da faixa de levantamento, o levantamento de pontos topográficos com o receptor móvel e estação total, a condução do barco, etc. Além disso, este quantitativo de mão de obra facilita as atividades de lançamento e retirada do barco do reservatório, o que geralmente é uma operação morosa.

Uma equipe maior do que três colaboradores não é recomendada, uma vez que aumenta o peso da embarcação, aumentando o tempo e os custos de deslocamento entre seções topográficas sucessivas, além de restringir o transporte

de material auxiliar necessário à implantação das seções a campo. Isto tudo permite uma maior agilidade no acesso, coleta de pontos e retirada do local monitorado, reduzindo o tempo e os custos do monitoramento.

O dimensionamento do barco deverá ser realizado com base no tamanho da equipe de trabalho e de todos os materiais e equipamentos necessários.

### 3.2.2.2 Instalação de seções topográficas

Esta atividade compreende a instalação das seções topográficas e o levantamento de pontos no terreno para elaboração dos perfis topográficos de cada local monitorado. Desta forma, serão descritas a seguir as atividades de transporte de coordenadas geográficas (X, Y) e cota altimétrica (Z) até o local alvo de monitoramento, a instalação e identificação das seções topográficas no terreno, o levantamento de pontos topográficos sobre cada seção topográfica, bem como a coleta detalhada de informações adicionais através de registro fotográfico e descrição das condições atuais do local monitorado.

#### 1. Transporte de coordenadas e cota

O transporte de coordenadas geográficas e cota altimétrica de um marco da RVG até o local de instalação de cada seção topográfica pode ser realizada por meio do sistema RTK (*Real Time Kinematic*). O sistema RTK consiste em um conjunto duplo de receptores de GPS, denominados de estação base e estação móvel (*rover*). A estação base permanece estacionada em um ponto conhecido (marco da RVG) e o receptor *rover* executa o caminhamento e coleta de pontos topográficos no terreno.

O diferencial deste sistema de levantamento é que ele permite o posicionamento em tempo real no campo a um alto nível de precisão. Na medida em que a coleta de pontos sobre o terreno é realizada pelo *rover*, o seu receptor de sinal GPS permuta informações com satélites em órbita e com a estação base, a qual executa correções de posicionamento em tempo real nas coordenadas coletadas pelo *rover*.

A representação esquemática apresentada na Figura 29 ilustra a estação base e a estação móvel (*rover*) em troca simultânea e integrada de informações, o que resulta em um posicionamento com alto nível de precisão.

Figura 29 – Representação esquemática do mecanismo de operação do sistema RTK (*Real Time Kinematic*) de levantamento topográfico.

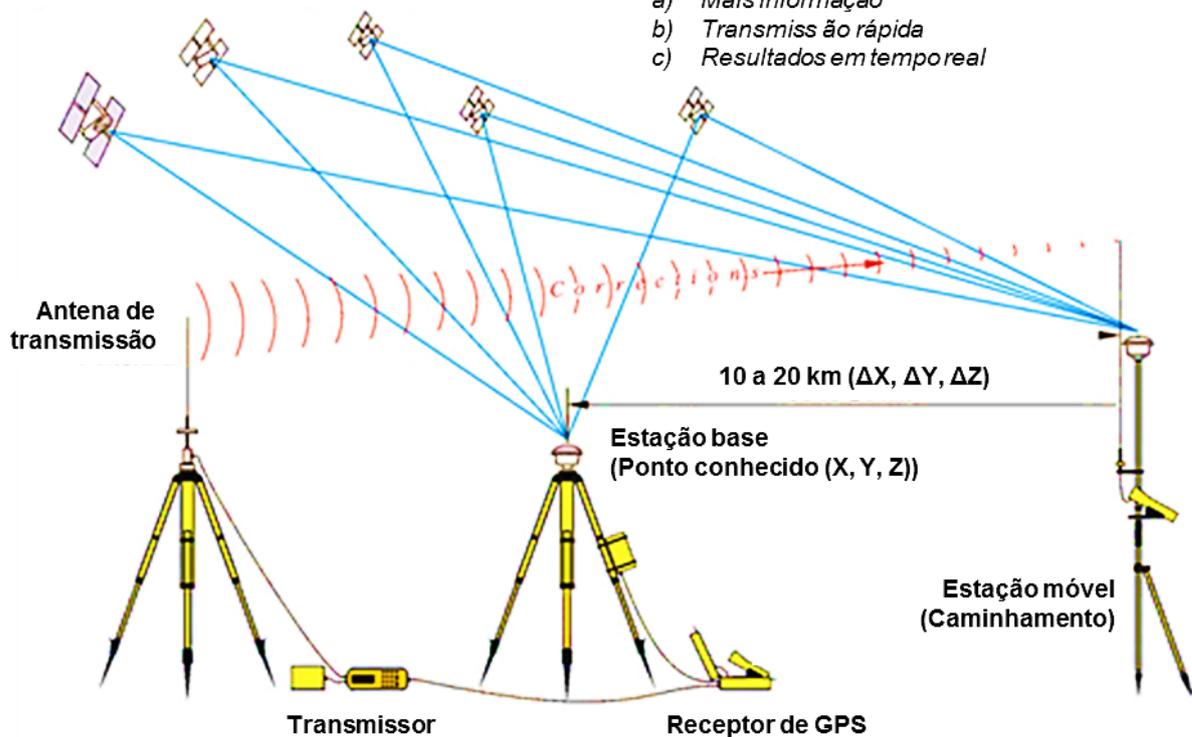
### **Real-Time-Kinematic (RTK)**

Acurácia de posicionamento de  $\pm 15$  mm

• **Mesma constelação de satélites**  
(Estação base – Rover ou rovers)

• **Sinal de rádio**

- a) Mais informação
- b) Transmissão rápida
- c) Resultados em tempo real



Fonte: Adaptado de SICKLE (2015).

O transporte de coordenadas geográficas e cota altimétrica inicia com a instalação da estação base. Neste caso, a primeira atividade consiste no acesso aos marcos da RVG posicionados nas margens (direita e esquerda) do reservatório. Com a ajuda do sistema GPS de navegação, deverá ser realizado o deslocamento via lacustre até o respectivo marco da RVG. Caso seja necessário, deverá ser realizada uma limpeza ou roçada em torno do marco, de modo a facilitar o acesso e a instalação da estação base.

A instalação da estação base inicia com o posicionamento do tripé topográfico, com sua base devidamente nivelada, sobre o marco da RVG. Sobre a base do tripé é fixado o receptor de sinal GPS, o qual deverá estar perfeitamente nivelado na horizontal e alinhado ao eixo vertical da marcação no centro da placa metálica fixada no topo central do marco (Figura 27A).

Na sequência, o receptor GPS da estação base é inicializado, configurado e as coordenadas geográficas e cota determinadas. Estas coordenadas serão posteriormente trianguladas com o receptor *rover* durante a coleta de pontos sobre o terreno, para que as correções de posicionamento em tempo real possam ser realizadas. O procedimento de instalação da estação base sobre o marco geodésico e a configuração da estação móvel (*rover*) pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Procedimento de instalação da estação base e configuração da estação móvel. (A) posicionamento do tripé e nivelamento de sua base; (B) posicionamento e nivelamento do receptor de sinal GPS sobre o marco da RVG; (C) medição de altura do receptor em relação ao topo da chapa metálica do marco da RVG e (D) configuração da estação móvel (*rover*) a partir das coordenadas geográficas fornecidas pela estação base e cota conhecida do marco da RVG.



Para aumentar o tempo de operação da estação base, é recomendado que o receptor permaneça conectado a uma bateria externa, de modo a manter as baterias internas do aparelho constantemente carregadas. O uso de bateria externa é especialmente importante durante extensas jornadas de levantamento de dados, o que dispensa a revisitação da estação base pelos técnicos de campo.

Após correta instalação da estação base e configuração da estação móvel pode-se dar início ao levantamento topográfico propriamente dito pela estação móvel, como será descrito a seguir.

Em caso de inexistência da RVG ao longo das margens do reservatório, é necessário o transporte de coordenadas e cota altimétrica a partir de um marco geodésico pertencente à Rede Altimétrica (RA) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) localizado o mais próximo possível do local do levantamento. Estas coordenadas podem ser transportadas até um marco provisório materializado no terreno através de um piquete de madeira. Sobre este marco provisório, que possuirá coordenadas planialtimétricas conhecidas, deverá ser devidamente instalada a estação base, conforme procedimento descrito anteriormente.

O transporte de coordenadas utilizando o sistema RTK até um marco provisório também é necessário quando a distância em linha reta entre a estação base e a estação móvel exceder os 15 - 20 km, que é a distância aproximada de operação entre os receptores sem prejuízo na recepção do sinal. No entanto, esta distância pode ser menor devido a obstáculos naturais como morros ou montanhas, que restringem a transmissão do sinal entre os receptores. Nestes casos, o uso de um marco provisório deverá ser utilizado, a fim de manter uma boa precisão dos pontos topográficos coletados pela estação móvel.

## 2. Instalação de seções topográficas

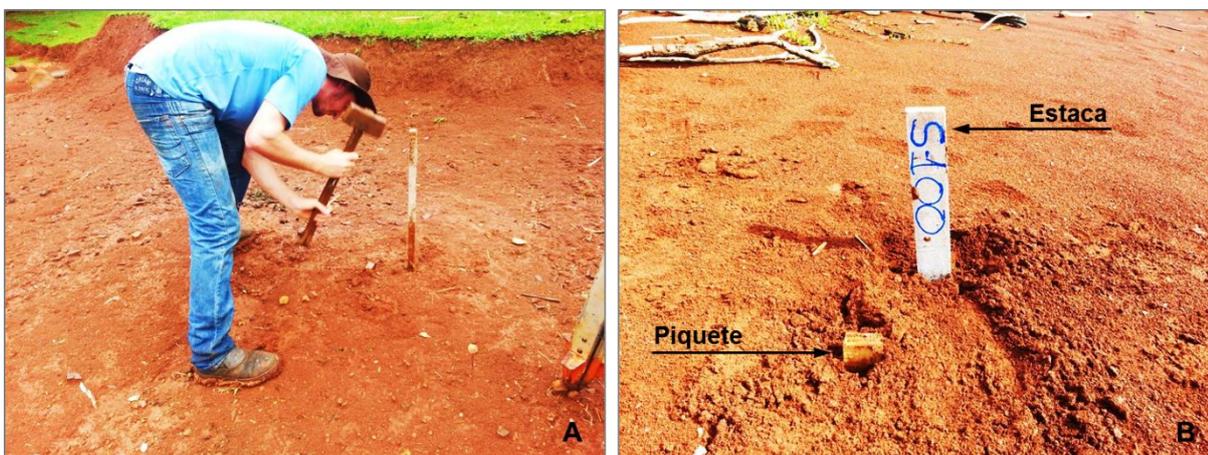
Após instalação da estação base é iniciada a visita dos locais alvos de monitoramento. Estes locais (determinados em fase de planejamento de escritório) podem ser acessados com barco e com suporte de um sistema GPS de navegação. Este procedimento permite o acesso rápido e preciso a todos os locais alvos de monitoramento, o que é indispensável para trabalhos de grande escala como é o caso de grandes reservatórios de água.

Após acesso ao local, a seção topográfica deverá ser materializada no terreno mediante cravação de um piquete de madeira com uma marcação no topo (pequeno prego, etc). O piquete em madeira deve ser cravado quase completamente, ou seja, o seu topo deve permanecer entre 2 a 3 cm acima da superfície do terreno.

Ao lado do piquete deverá ser cravada uma estaca em madeira a aproximadamente 0,50 m de distância, com o objetivo de identificar a seção topográfica, bem como facilitar sua visualização durante levantamentos posteriores. A cravação do piquete e da estaca pode ser executada no talude inferior (dentro do reservatório) ou no terreno natural (zona sem influência da oscilação do reservatório), a depender das condições de cada local e da facilidade de instalação.

A cravação do piquete e da estaca caracteriza a instalação e a localização definitiva de cada seção topográfica no terreno, como observado na Figura 31.

Figura 31 – Procedimento de instalação de seções topográficas. (A) cravação de piquete e estaca de madeira para materialização e identificação da seção topográfica, respectivamente e (B) aspecto geral após cravação definitiva do piquete e estaca em madeira.



Fonte: O autor.

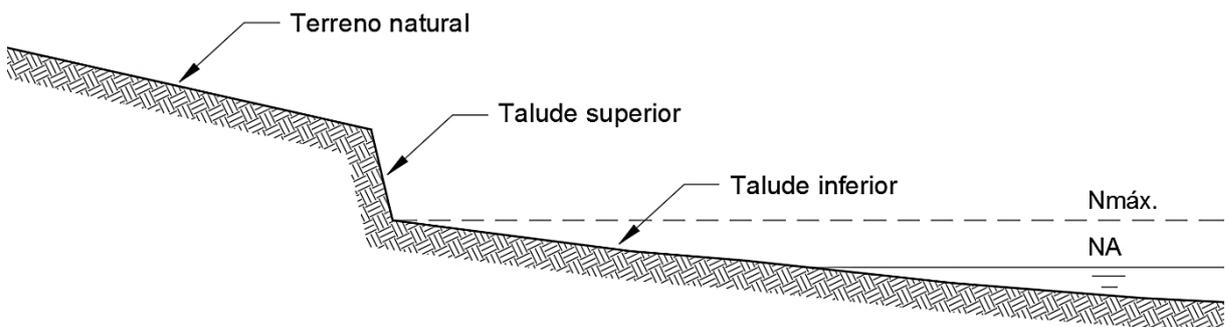
O ponto exato de instalação da seção pode variar em relação às coordenadas definidas na fase de planejamento de escritório e fornecidas ao responsável pelo levantamento. O ajuste da localização definitiva da seção está condicionado à conformação atual do local no momento da visita. A eventual ocorrência de alterações recentes do local provocados por deslizamentos, ou outros, pode resultar em não representatividade da seção topográfica para o subtrecho em questão. Neste caso a seção deverá ser realocada próximo do local original, seguindo os

critérios de locação definidos anteriormente com base em características visualmente identificáveis e semelhantes.

### 3. Levantamento de pontos topográficos

O levantamento de dados a campo será executado na margem do reservatório, o qual engloba uma porção de terreno adjacente e dos taludes lacustres. De modo a facilitar a descrição dos procedimentos de levantamento, optou-se por desenvolver uma nomenclatura específica para os diferentes segmentos do terreno, a qual pode ser observada na Figura 32.

Figura 32 – Nomenclatura adotada para os diferentes segmentos do terreno que compõem as margens de reservatórios de água.



Fonte: O autor.

Cada seção topográfica deverá abranger os três segmentos do terreno, nomeadamente terreno natural, talude superior e talude inferior. Primeiramente é executado o transporte das coordenadas geográficas e da cota altimétrica posicionando-se a estação móvel (RTK) sobre o piquete de madeira. Na sequência é coletado o primeiro ponto topográfico no terreno natural com a estação móvel, de modo a estabelecer um alinhamento (linha imaginária) passando pelo piquete em madeira e ortogonalmente em relação às curvas de nível do terreno e à cota máxima do reservatório (Figura 33 e Figura 34).

Após determinação do alinhamento da seção topográfica pode-se dar início ao levantamento do terreno. Este levantamento pode ser realizado somente com o sistema RTK ou combinado com a estação total, a depender do rendimento desejado, bem como da disponibilidade de equipamentos e mão de obra.

Em caso de utilização dos dois sistemas de levantamento, instala-se a estação total sobre o piquete em madeira cravado anteriormente. Este piquete possui uma marcação no topo, geralmente um prego, sobre o qual a estação total deverá ser instalada e nivelada (Figura 35). Como a posição (X, Y, Z) do topo do piquete já foi determinada anteriormente na fase de transporte de coordenadas com RTK, os dados coletados pela estação total poderão ser devidamente processados na fase de análise de dados em escritório.

Figura 33 – (A) representação esquemática do alinhamento ortogonal da seção topográfica em relação às curvas de nível do terreno e à cota máxima do reservatório e (B) representação esquemática da seção topográfica no terreno natural, talude superior e talude inferior.

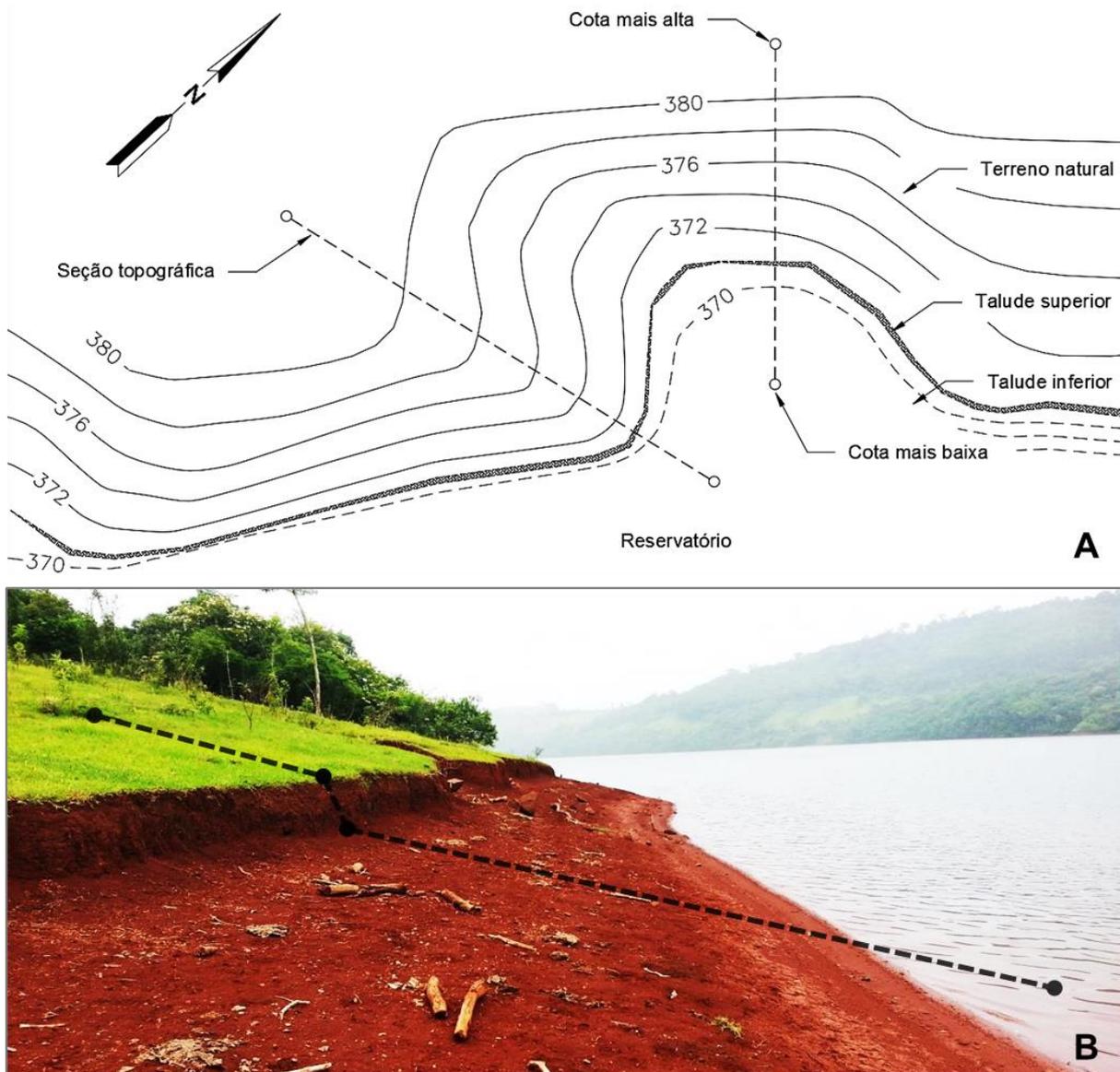


Figura 34 – (A) transporte de coordenadas geográficas (X, Y) e cota altimétrica (Z) com sistema RTK até o local de implantação da seção topográfica (a estação móvel está posicionada sobre o piquete) e (B) coleta de primeiro ponto topográfico no terreno natural para determinação do alinhamento ortogonal da seção em relação às curvas de nível do terreno e à cota máxima do reservatório.



Fonte: O autor.

Figura 35 – Procedimento de instalação de estação total. (A) posicionamento e nivelamento do tripé; (B) pré-posicionamento da estação total; (C) nivelamento e posicionamento da estação total sobre o tripé e o piquete, respectivamente e (D) coleta de pontos sobre o alinhamento da seção topográfica.

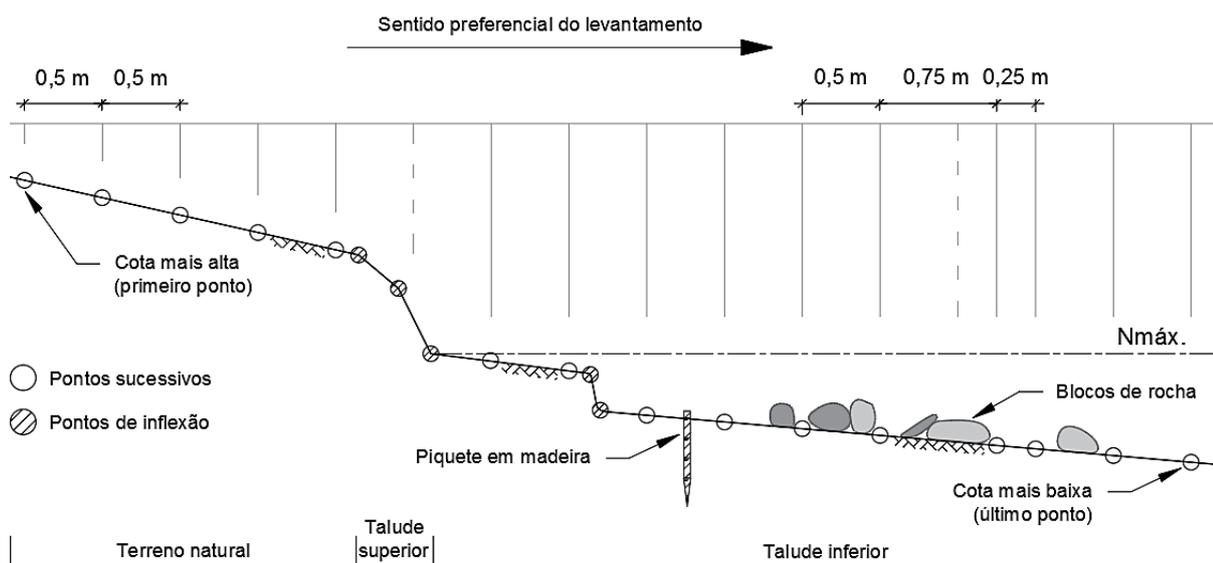


Fonte: O autor.

A coleta de pontos sobre o alinhamento da seção topográfica deve ser executada preferencialmente da maior cota (terreno natural), passando pelo talude superior até a menor cota (talude inferior) localizada dentro do reservatório, conforme representado esquematicamente na Figura 36. Desta forma eliminam-se erros grosseiros que eventualmente podem ocorrer devido a um procedimento desordenado de coleta de pontos sobre a seção. Ou seja, deve-se primar por clareza entre a porção da seção monitorada e por monitorar.

Caso sejam usados dois sistemas de levantamento topográfico concomitantemente (sistema RTK e estação total, por exemplo), a coleta de pontos pode ocorrer no sentido dos extremos para o centro da seção topográfica.

Figura 36 – Representação esquemática do procedimento de coleta de pontos sobre o alinhamento da seção topográfica.



Fonte: O autor.

Em função da heterogeneidade geomorfológica encontrada ao longo das margens de reservatórios de água, cada local apresentará particularidades específicas que deverão ser observadas durante o levantamento topográfico.

No segmento de terreno natural, a largura recomendada da faixa por monitorar é de pelo menos 5,0 metros. O levantamento do terreno presente nesta faixa é importante para análise posterior do recuo da margem a partir de campanhas sucessivas de monitoramento.

O primeiro ponto coletado (cota mais alta da seção) geralmente determina o alinhamento topográfico sobre o qual todos os demais pontos devem ser tomados. A partir do primeiro ponto devem ser coletados pontos sucessivos distanciados horizontalmente no máximo 0,50 m, em caso de superfícies aproximadamente regulares. Em caso de superfícies muito irregulares, a distância entre pontos sucessivos deverá ser diminuída, o que resulta num aumento de pontos coletados. Esta constatação sugere que os pontos devem ser tomados espacialmente com base no bom senso do técnico responsável e de tal forma que o produto resultante reproduza, de forma mais fiel possível, a superfície real do terreno.

A coleta de pontos topográficos no terreno natural geralmente é a mais dispendiosa devido à presença de vegetação. Quando este for o caso, a vegetação deverá ser removida numa faixa aproximada de 0,50 m de largura e comprimento equivalente ao segmento do terreno alvo de monitoramento. Desta forma a tomada de pontos pelo sistema RTK e/ou estação total é facilitada, o que diminui o tempo de levantamento por seção topográfica.

Assim como no terreno natural, a coleta de pontos sobre o talude superior e talude inferior deve ser executada de forma bastante criteriosa e detalhada. A tomada de pontos no talude superior deve atentar especialmente para a determinação precisa e exata da crista e da base do talude (pontos de inflexão) (Figura 36). Isto porque a tomada pouco atenciosa destes dois pontos pode resultar em recuos de margem e perdas de solo pouco realistas durante a análise das seções topográficas do local obtidas por levantamentos sucessivos.

Além da crista e da base do talude, deve se ter especial atenção ao levantamento de todos os pontos intermediários de inflexão que possam existir no talude superior, de modo que o levantamento resultante reproduza, de forma mais fiel possível, a superfície do mesmo (Figura 36).

Em função da verticalidade e da necessidade de determinação da crista, de pontos de inflexão intermediários e da base do talude superior, o espaçamento horizontal de 0,5 m entre pontos sucessivos deve ser ignorada nesta porção da seção topográfica. Isto significa que a distância horizontal nestes casos poderá ser inferior à distância mínima definida, de forma a não incorrer em perda de detalhamento da superfície do talude.

A coleta de pontos sucessivos no talude inferior, assim como no terreno natural, deve ser executada no máximo a cada 0,50 m de distância horizontal, conforme representado na Figura 36. No entanto, esta distância horizontal também pode ser inferior toda vez que a superfície do terreno apresente pontos de inflexão, conforme descrito para o talude superior.

Em muitos casos o talude inferior pode apresentar blocos de rocha remanescentes sobre a superfície após remoção do solo de seu entorno pela erosão lacustre. Mesmo com presença de blocos de rocha, os pontos topográficos devem ser coletados sobre a superfície do talude nos espaços vazios formados entre os blocos, ou seja, os blocos não devem ser monitoradas e incorporadas ao perfil da seção topográfica. Isto porque a diferença para trechos com ausência total de blocos de rocha é que os mesmos conferem cobertura superficial parcial ao talude, protegendo-o do impacto das ondas e da oscilação do nível do reservatório. Ou seja, a presença de blocos de rocha no talude pode condicionar a intensidade da erosão e, portanto, os mesmos não devem ser identificados no levantamento.

Quando houver grande densidade de blocos de rocha sobre a superfície do solo, a distância horizontal (0,50 m) entre pontos sucessivos deve ser ajustada, conforme a realidade do local alvo de monitoramento. Além disso, estes não devem ser movimentados e reposicionados à sua posição original como forma de facilitação da coleta de pontos. Ao mesmo tempo deve-se atentar para que todos os pontos coletados permaneçam posicionados sobre a seção topográfica (linha imaginária), inclusive em campanhas sucessivas de levantamento, de modo que seja possível acompanhar a evolução real do talude ao longo do tempo.

Os trechos de margens que apresentem o talude inferior densamente coberto por blocos de rocha geralmente não apresentam erosão evidente e, portanto, não necessitam ser monitorados. No entanto, do ponto de vista acadêmico e científico, 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 que provavelmente apresentam taxas de erosão acelerada.

Conforme observado na Figura 36, à medida que ocorre erosão do talude inferior e do talude superior, os pontos de inflexão do terreno adquirem novas posições. Isto sugere que os pontos de campanhas sucessivas de medição não devem ser tomados nas mesmas coordenadas geográficas (X, Y), mas onde se

fizerem necessários, já que o talude inferior e o talude superior têm suas superfícies modificadas constantemente pela ação do reservatório.

A Figura 37 apresenta alguns detalhes do procedimento de coleta de pontos.

Figura 37 – Detalhes do procedimento de coleta de pontos. (A) utilização do sistema RTK e estação total; (B) coleta de pontos com sistema RTK no terreno natural; (C) detalhe do levantamento da crista do talude; (D) detalhe do levantamento da base do talude; (E) detalhe do levantamento de pontos de inflexão e (F) coleta de pontos sobre o solo nos espaços formados entre os blocos de rocha.



Fonte: O autor.

O levantamento das seções topográficas deve ser executado quando o nível de operação do reservatório estiver em uma cota baixa, o que coincide com a época seca do ano. Nesta condição o talude inferior estará com sua superfície exposta, o que permite um levantamento topográfico mais preciso e em um tempo menor para cada seção topográfica. Outra justificativa do levantamento durante a época seca do ano é a disponibilização de tempo para que o solo desestruturado pelas ondas nas porções superiores do talude seja arrastado para dentro do reservatório, à medida que ocorre o rebaixamento do nível da água.

De forma geral, normalmente é realizada apenas uma campanha de medição por ano devido ao regime de chuvas na bacia de contribuição. O intervalo de um ano entre campanhas sucessivas é favorável ao monitoramento, pois favorece a atuação prolongada das ondas e do efeito de oscilação do nível do reservatório sobre os taludes.

A determinação da cota mínima do reservatório favorável ao levantamento deverá ser fixada antes da primeira campanha de coleta de dados. A partir de então, as campanhas sucessivas de medição deverão realizar a coleta do último ponto da seção topográfica sempre na mesma cota mínima previamente fixada. A observação deste aspecto é importante para a quantificação posterior das perdas de solo ao longo dos taludes. A determinação da cota mínima está condicionada ao objetivo do levantamento e ao nível mínimo de operação regular do reservatório. Desta forma, deverão ser obtidos e analisados os dados históricos de operação do nível do reservatório ao longo do ano, de modo que se possa determinar tecnicamente a cota mínima viável ao monitoramento, bem como a época do ano mais favorável para realização do mesmo.

De forma geral, a coleta de pontos sobre a seção topográfica pode ser realizada até no máximo 0,50 m abaixo do nível da água, sem prejuízo à precisão dos dados coletados. Portanto, esta condição também pode ser considerada durante a fase de estudo da cota mínima para o levantamento das seções topográficas.

#### 4. Registro fotográfico do local

O levantamento fotográfico refere-se especialmente ao registro das características do local (solo, presença de blocos de rocha, madeira, vegetação, etc) de implantação de cada seção topográfica. As fotografias podem ser tomadas a

partir do barco em posição frontal ao talude ou em várias perspectivas a partir do talude (sentido montante e jusante da margem, etc), a depender da necessidade e complexidade fisionômica de cada local.

O registro fotográfico poderá ser utilizado posteriormente na fase de análise das seções topográficas em escritório, bem como servir de informação complementar à descrição morfológica do local. O registro fotográfico também deverá contemplar as atividades de instalação e levantamento de cada seção topográfica, em caso de necessidade de comprovação da execução do serviço perante o contratante ou órgão fiscalizatório. O registro fotográfico de cada local deve ser atualizado a cada campanha de levantamento.

#### 5. Descrição complementar do local

A descrição morfológica das condições atuais do local deve ser realizada para cada seção topográfica durante cada campanha de monitoramento. Esta descrição consiste no levantamento de informações complementares relativas ao terreno natural, talude superior e talude inferior. A coleta de dados pode ser realizada com o auxílio de uma planilha de campo que considere aspectos técnicos (vegetação, solo, instabilidades geotécnicas, etc) e aspectos sociais (risco a construções, perda de áreas de uso recreativo e/ou econômico, etc) ou outras informações, conforme necessidade e nível de detalhamento desejado.

Esta descrição é importante e complementar às informações obtidas pelo levantamento topográfico e registro fotográfico para descrição das condições atuais de cada local. Além disso, a posse de informações complementares contribui, em muitos casos, na compreensão das causas da erosão observada para o mesmo local entre campanhas sucessivas de monitoramento. A planilha auxiliar de campo para descrição complementar de cada local monitorado encontra-se no Apêndice A.

Figura 38 - Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de monitoramento topográfico do monitoramento de processos erosivos.



Fonte: O autor.

### 3.2.3 Análise de dados

A etapa de análise de dados prevê a execução das atividades de processamento de dados e análise de seções topográficas. Em cada atividade estão previstas e execução de tarefas, as quais serão descritas detalhadamente na sequência. Ao término da descrição relativa à análise de dados é apresentado um fluxograma na Figura 43 que reúne todas as atividades e tarefas descritas.

#### 3.2.3.1 Processamento de dados

A atividade de processamento de dados se refere ao trabalho de escritório por meio do uso de ferramentas computacionais. É nesta atividade que ocorre o início

da análise dos pontos topográficos coletados a campo por meio da elaboração de perfis topográficos do terreno, também denominadas seções topográficas.

As atividades a serem desenvolvidas englobam a transferência de pontos topográficos do sistema RTK e/ou estação total para um computador, a elaboração de um perfil topográfico para cada local monitorado e, por fim, a exportação dos dados processados em arquivos editáveis.

### 1. Transferência de pontos topográficos

Após o levantamento de pontos a campo, os dados brutos armazenados nos equipamentos topográficos devem ser transferidos para um computador habilitado com um *software* específico de análise topográfica.

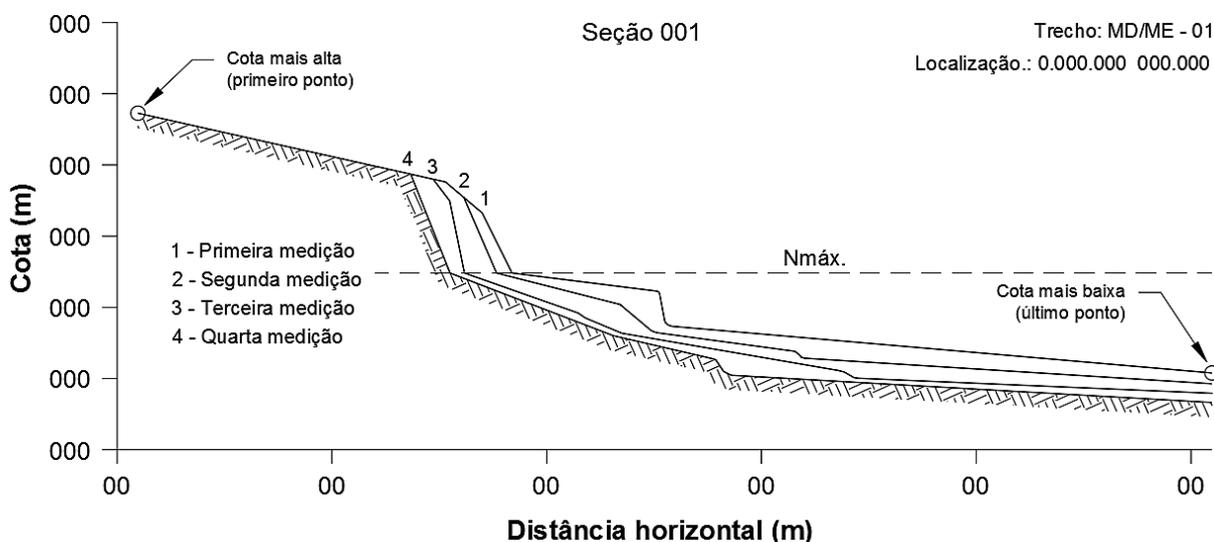
### 2. Elaboração de perfis topográficos

A elaboração dos perfis é executada em *softwares* específicos de análise topográfica. Os *softwares* comumente utilizados para este tipo de trabalho são *TopograPH*<sup>®</sup>, *DataGeosis*<sup>®</sup>, *Sistema Posição*<sup>®</sup>, *GeoOffice*<sup>®</sup> e *TopoEVN*<sup>®</sup>.

Como a metodologia de monitoramento proposta pressupõe a execução de campanhas sucessivas de levantamento no mesmo local, os perfis topográficos resultantes deverão ser processados sobre um único gráfico, conforme representado esquematicamente na Figura 39.

A Figura 39 ilustra, de forma conceitual e esquemática, o resultado obtido através de campanhas sucessivas de levantamento topográfico a campo. Como cada campanha de monitoramento registra a condição atual de cada local por meio de um perfil topográfico, a plotagem de perfis topográficos sucessivos sobre o mesmo gráfico permitirá a análise da evolução das margens ao longo do tempo.

Figura 39 – Representação esquemática de perfis topográficos obtidos a partir de campanhas sucessivas de monitoramento do mesmo local.



Fonte: O autor.

### 3. Exportação de dados em arquivos editáveis

A elaboração dos perfis topográficos relativos a cada campanha de monitoramento deve ser executada, preferencialmente, por um especialista em geomensura. Na posse dos perfis de todos os locais monitorados, estes podem ser agrupados e exportados em arquivo editável (.dwg) para análise posterior em *software* de desenho assistido por computador.

A interface de trabalho que contém os perfis topográficos deve ser editável, para que o técnico responsável pela análise das seções topográficas possa obter com facilidade informações acerca da erosão ocorrida em um determinado período de tempo em cada local. A partir dos perfis sucessivos deve ser possível obter informações de recuo da margem, área transversal, volume de solo erodido, etc.

Além dos arquivos editáveis em *software* de desenho assistido por computador, é aconselhado o fornecimento dos dados de localização (X, Y, Z) dos pontos topográficos coletados em cada seção. Estes dados podem ser fornecidos em planilha *Microsoft Excel* (.xls). A organização dos dados pode ser realizada conforme modelo apresentado no Apêndice B.

A exportação destes dados permite a verificação precisa da localização dos pontos que constituem cada seção topográfica instalada a campo. Em alguns casos

o fornecimento destes dados pode ser obrigatório para consulta pela empresa contratante, bem como de órgãos fiscalizatórios. Além disso, podem ainda ser adicionados os pontos coletados em cada seção topográfica ao arquivo digital do *Google Earth Pro*<sup>®</sup> (descrito no item 3.2.1.2) para posterior exportação e análise.

### 3.2.3.2 Análise de seções topográficas

Nesta fase executa-se a análise dos processos erosivos que ocorrem em cada local monitorado. Os dados exportados na fase anterior em formato editável (.dwg) podem ser analisados em *software* específico para descrever o comportamento da erosão através da evolução do talude afetado.

Portanto, serão descritas na sequência, as informações que poderão ser obtidas a partir da análise dos perfis topográficos. Estas informações poderão ser organizadas, descritas e apresentadas na forma de um relatório técnico final e fornecido ao contratante do monitoramento, que por sua vez poderá repassá-lo aos órgãos ambientais competentes, quando for o caso. A descrição a ser apresentada se refere principalmente ao talude superior e talude inferior, que são os segmentos do terreno diretamente afetados pela erosão lacustre.

#### 1. Talude superior

A avaliação do comportamento do processo erosivo em cada local de margem monitorado pode ser realizada de diferentes formas, a depender do objetivo e necessidade da análise. A verificação da perda e deposição de solo nos taludes pode ser descrita mediante obtenção direta de dados provenientes das seções topográficas e aplicação de equações matemáticas simples. Desta forma, as ferramentas de análise apresentadas a seguir visam orientar o técnico responsável na descrição quantitativa dos processos erosivos atuantes em cada local.

Um primeiro dado de interesse da empresa operadora do empreendimento hidrelétrico e dos órgãos ambientais de fiscalização é a magnitude e a velocidade de recuo da crista do talude. A obtenção desta variável é importante, pois é a partir dela que se pode acompanhar a manutenção da largura mínima da faixa de área de proteção permanente (APP) obrigatória ao longo das margens do reservatório.

A análise do recuo da crista do talude superior pode ser realizada em diferentes ocasiões, isto é, entre campanhas com intervalos de medição curtos (processos erosivos intensos) ou intervalos de medição longos (processos erosivos brandos). Em caso de processos erosivos pouco intensos, pode não ocorrer recuo da crista entre campanhas sucessivas de medição, principalmente quando o intervalo de medição for pequeno (6 a 12 meses, por exemplo). Neste caso, deverão ser realizadas mais campanhas de monitoramento para verificar se houve recuo de margem pelo avanço do reservatório. Quanto menor for o recuo, tanto menor será o volume de solo erodido e a área de preservação permanente afetada.

O recuo da crista do talude superior ( $R_c$ ) pode ser obtido por medição direta das seções topográficas, conforme representado esquematicamente na Figura 40. O recuo também pode ser relacionado ao intervalo de tempo considerado em campanhas sucessivas, conforme demonstrado na Equação 4:

$$i_{rc} = \frac{R_c}{\Delta t} \quad (4)$$

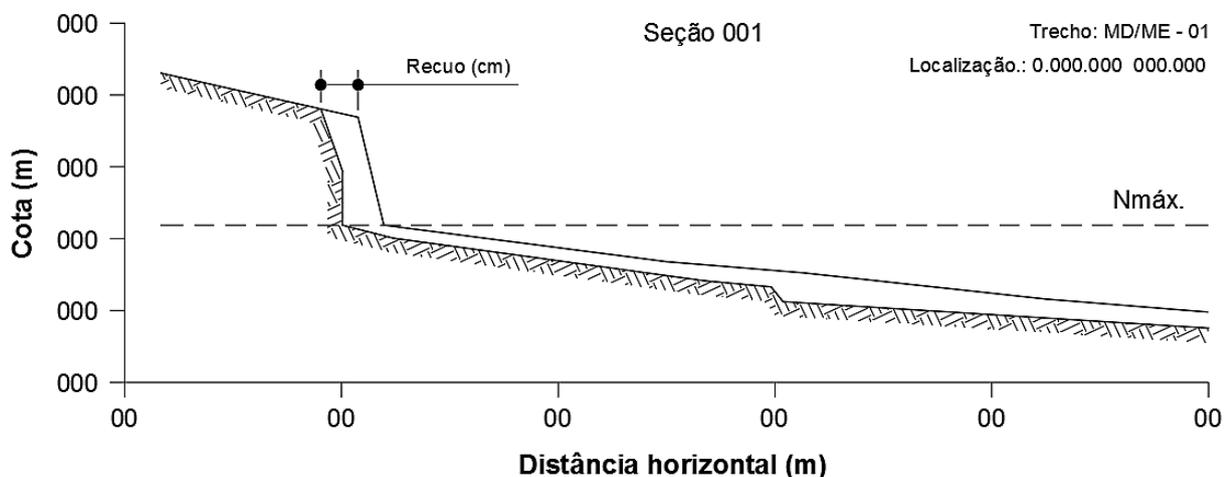
em que:

$i_{rc}$ , taxa de recuo da crista do talude superior (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...);

$R_c$ , recuo da crista (cm, m, ...);

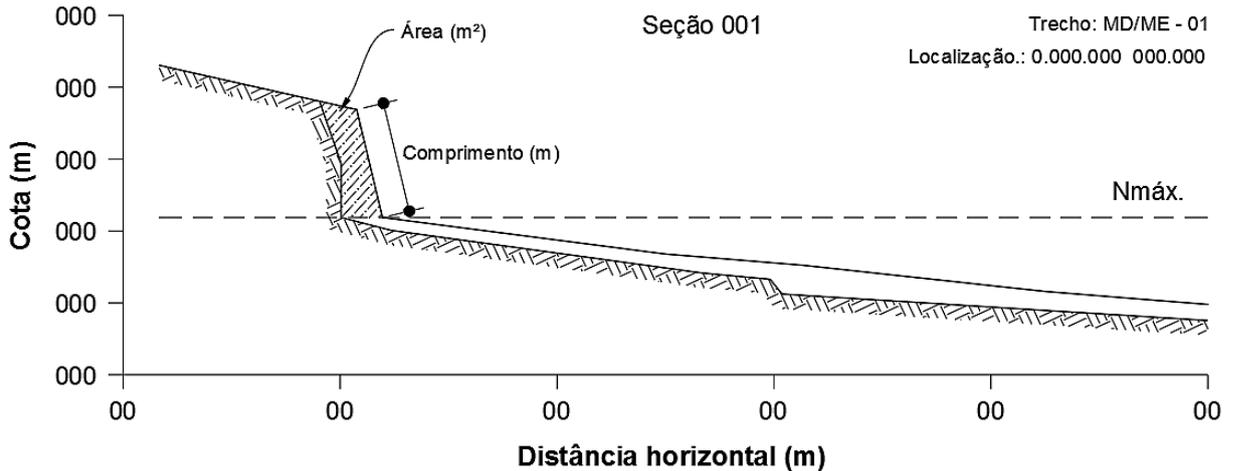
$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

Figura 40 – Representação esquemática para medição do recuo da crista ( $R_c$ ) do talude superior.



O recuo da margem também pode ser analisado considerando o talude superior como um todo, isto é, considerando a área transversal de solo erodido ( $A_{e\ ts}$ ) e o seu comprimento ( $C_{ts}$ ), conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Representação esquemática para medição da área de solo erodido ( $A_{e\ ts}$ ) no talude superior.



Fonte: O autor.

A análise do recuo médio do talude superior é interessante quando a sua superfície apresenta muitas irregularidades (pontos de inflexão do terreno), o que dificulta a determinação média aproximada do recuo do talude como um todo. Este tipo de abordagem também possibilita obter um valor de recuo médio da margem no comprimento erodido quando ocorrer perda visível de solo somente na base do talude superior e não na sua crista. Isto pode acontecer com frequência considerando períodos curtos de avaliação ou quando o regime de operação do reservatório não tenha permitido a plena atuação dos agentes erosivos.

Em algumas porções do talude superior pode ocorrer a deposição de pequenas quantidades de solo ( $A_{d\ ts}$ ) em função de conformações irregulares do terreno. Nesse caso há o aporte de solo em alguns pontos do talude, sendo, no entanto, geralmente desprezível em relação à área transversal total de solo removido pelos agentes erosivos.

O recuo médio do talude superior ao longo do comprimento deflagrado com erosão pode ser determinado pela Equação 5:

$$R_{m\ ts} = \frac{A_{e\ ts} - A_{d\ ts}}{C_{ts}} \quad (5)$$

em que:

$R_{m\ ts}$ , recuo médio do talude superior no comprimento erodido (cm, m, ...);

$A_{e\ ts}$ , área de solo erodido no talude superior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$A_{d\ ts}$ , área de solo depositado no talude superior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$C_{ts}$ , comprimento do talude superior (cm, m, ...).

À semelhança da taxa de recuo da crista do talude superior, o recuo médio do talude superior ( $R_{m\ ts}$ ) também pode ser relacionado ao intervalo de tempo considerado em campanhas sucessivas, como demonstrado pela Equação 6:

$$i_{r\ ts} = \frac{R_{m\ ts}}{\Delta t} \quad (6)$$

em que:

$i_{r\ ts}$ , taxa de recuo do talude superior (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...);

$R_{m\ ts}$ , recuo médio do talude superior no comprimento erodido (cm, m, ...);

$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

A taxa de recuo da crista e a taxa de recuo do talude superior não são necessariamente coincidentes. Isto porque a remoção de solo do talude de forma geral ocorre inicialmente apenas na base do talude superior devido ao embate direto das ondas quando o reservatório se encontra em sua cota máxima. Após certo período de tempo, considerando sucessivas oscilações máximas do reservatório e as características de cada local, a falta de sustentação da base do talude provoca o desencadeamento de pequenos deslizamentos. Apenas quando esse mecanismo é deflagrado é que se verifica, geralmente, um recuo significativo da crista do talude.

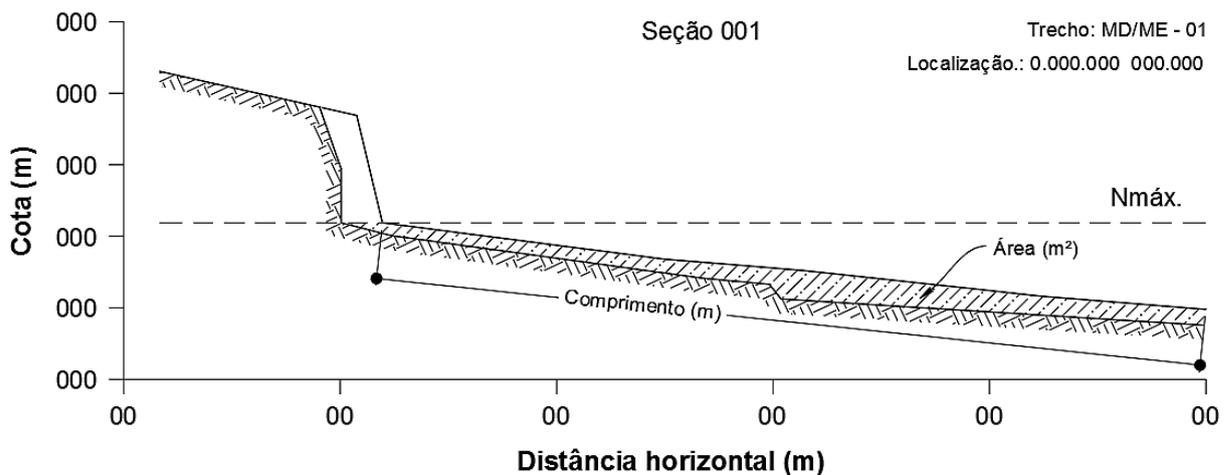
## 2. Talude inferior

Assim como para o talude superior, o talude inferior também sofre desestruturação e transporte de solo provocado pelo efeito das ondas e pelo efeito

de subidas e descidas regulares do nível de água do reservatório. Desta forma, grandes quantidades de solo também podem ser perdidas nesta porção da margem.

A perda de solo verificada no talude inferior pode facilmente ser medida em *software* específico (e. g. *AutoCAD*<sup>®</sup>) com base nas seções topográficas sucessivas obtidas pelo monitoramento, conforme pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 – Representação esquemática para medição da área de solo erodido no talude inferior.



Fonte: O autor.

Um aspecto importante de ser notado, o qual não se encontra representado na Figura 42, é a ocorrência de deposição de solo advindo geralmente do talude superior ou ainda do terreno natural. Nesse caso há o aporte de material em alguns pontos do talude inferior, o que por sua vez tende a compensar a área transversal de solo removido pela erosão.

Com base na área transversal de solo erodido ( $A_{e\ ti}$ ) e depositado ( $A_{d\ ti}$ ) ao longo de um determinado comprimento do talude inferior, pode-se determinar o recuo médio do talude ao longo do segmento de talude inferior considerado, conforme demonstrado pela Equação 7:

$$R_{m\ ti} = \frac{A_{e\ ti} - A_{d\ ti}}{C_{ti}} \quad (7)$$

em que:

$R_{m\ ti}$ , recuo médio do talude inferior no comprimento erodido (cm, m, ...);

$A_{e\ ti}$ , área de solo erodido no talude inferior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$A_{d\ ti}$ , área de solo depositado no talude inferior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$C_{ti}$ , comprimento do talude inferior (cm, m, ...).

O recuo médio do talude inferior pode ser relacionado ao intervalo de tempo necessário para que o recuo ocorra, conforme estabelecido pela Equação 8:

$$i_{e\ ti} = \frac{R_{m\ ti}}{\Delta t} \quad (8)$$

em que:

$i_{r\ ti}$ , taxa de recuo do talude inferior (cm/mês, cm/ano, m/mês, m/ano, ...);

$R_{m\ ti}$ , recuo médio do talude inferior no comprimento erodido (cm, m, ...);

$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

### 3. Seção topográfica

A soma da área transversal de solo erodido no talude superior e no talude inferior entre um determinado intervalo de tempo caracteriza a porção de solo removido do perfil topográfico do local monitorado. Quando a soma da área transversal de solo erodido dos taludes for considerada em relação ao comprimento longitudinal unitário de margem (1,0 m), a operação matemática resultante fornece o volume de solo erodido por seção topográfica, conforme demonstrado pela Equação 9:

$$V_{e\ s} = (A_{e\ ts} - A_{d\ ts}) + (A_{e\ ti} - A_{d\ ti}) \quad (9)$$

em que:

$V_{e\ s}$ , volume de solo erodido na seção topográfica (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, ...);

$A_{e\ ts}$ , área de solo erodido no talude superior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$A_{d\ ts}$ , área de solo depositado no talude superior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$A_{e\ ti}$ , área de solo erodido no talude inferior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...);

$A_{d\ ti}$ , área de solo depositado no talude inferior (cm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>, ...).

O volume de solo erodido por comprimento longitudinal unitário de margem pode ser relacionado com o intervalo de tempo necessário para a sua remoção, conforme estabelecido pela Equação 10:

$$i_{v_s} = \frac{V_{es}}{\Delta t} \quad (10)$$

em que:

$i_{v_s}$ , 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, ...);

$V_{es}$ , volume de solo erodido na seção topográfica (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, ...);

$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

Com base na Equação 9 pode-se determinar o peso de solo erodido por comprimento unitário de margem, conforme apresentado pela Equação 11:

$$P_{e_s} = V_{es} \cdot \rho_s \quad (11)$$

em que:

$P_{e_s}$ , peso de solo erodido na seção topográfica (kg, ton);

$V_{es}$ , volume de solo erodido na seção topográfica (cm<sup>3</sup>, m<sup>3</sup>, ...);

$\rho_s$ , densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>, ton/m<sup>3</sup>).

O peso de solo erodido pode ser relacionado com o intervalo de tempo necessário para a sua remoção, conforme estabelecido pela Equação 12:

$$i_{p_s} = \frac{P_{es}}{\Delta t} \quad (12)$$

em que:

$i_{p_s}$ , taxa de peso de solo erodido na seção topográfica (kg/mês, ton/mês, kg/ano, ton/ano,...);

$P_{e_s}$ , peso de solo erodido na seção topográfica (kg, ton);

$\Delta t$ , período de tempo considerado (mês, ano, ...).

#### 4. Trecho/subtrecho

Com base na Equação 9 pode-se estimar o volume de solo erodido ao longo do trecho ou subtrecho monitorado por cada seção topográfica, multiplicando-a pelo comprimento do respectivo trecho ou subtrecho, conforme determinado pela Equação 13:

$$V_{et} = (A_{ets} - A_{dts}) + (A_{eti} - A_{diti}) \cdot C_m \quad (13)$$

em que:

$V_{et}$ , volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>);

$A_{ets}$ , área de solo erodido no talude superior (m<sup>2</sup>);

$A_{dts}$ , área de solo depositado no talude superior (m<sup>2</sup>);

$A_{eti}$ , área de solo erodido no talude inferior (m<sup>2</sup>);

$A_{diti}$ , área de solo depositado no talude inferior (m<sup>2</sup>);

$C_m$ , comprimento do trecho ou subtrecho considerado (m).

O volume de solo erodido no subtrecho considerado pode ser relacionado com o intervalo de tempo necessário para a sua remoção, conforme estabelecido pela Equação 14:

$$i_{vt} = \frac{V_{et}}{\Delta t} \quad (14)$$

em que:

$i_{vt}$ , taxa de volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>/mês, m<sup>3</sup>/ano, ...);

$V_{et}$ , volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>);

$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

Com base na Equação 13 pode-se determinar o peso de solo erodido no trecho ou subtrecho considerado, conforme apresentado pela Equação 15:

$$P_{et} = V_{et} \cdot \rho_s \quad (15)$$

em que:

$P_{et}$ , peso de solo erodido no trecho ou subtrecho considerado (kg, ton);

$V_{et}$ , volume de solo erodido no trecho ou subtrecho (m<sup>3</sup>);

$\rho_s$ , densidade do solo (kg/m<sup>3</sup>, ton/m<sup>3</sup>).

O peso de solo erodido pode ser relacionado com o intervalo de tempo necessário para a sua remoção, conforme estabelecido pela Equação 16:

$$i_{pt} = \frac{P_{et}}{\Delta t} \quad (16)$$

em que:

$i_{pt}$ , taxa de peso de solo erodido no trecho ou subtrecho (kg/mês, ton/mês, kg/ano, ton/ano, ...);

$P_{et}$ , peso de solo erodido no trecho ou subtrecho considerado (kg, ton);

$\Delta t$ , intervalo de tempo considerado (mês, ano, ...).

## 5. Relatório técnico final

As informações pertinentes ao monitoramento podem, por fim, ser compiladas em um relatório técnico final e apresentadas ao contratante do serviço.

Este relatório poderá ser elaborado a critério do técnico responsável e/ou especificidades do contrato de monitoramento. As informações essenciais que poderão constar são a localização e o comprimento dos trechos de margem monitorados, a localização e o número de seções topográficas instaladas em cada trecho, o registro fotográfico bem como a descrição e a análise dos processos erosivos de cada ponto monitorado.

Além disso, o relatório técnico final poderá apresentar uma classificação das áreas mais problemáticas do ponto de vista de perda de solo. Esta classificação poderá ser realizada com base na análise dos dados obtidos a partir das seções topográficas. Estas informações poderão ser utilizadas pela empresa responsável pelo reservatório para o planejamento e execução de ações e medidas de controle dos processos erosivos vigentes.

Figura 43 - Fluxograma de atividades e tarefas envolvidas na etapa de análise de dados do monitoramento de processos erosivos.



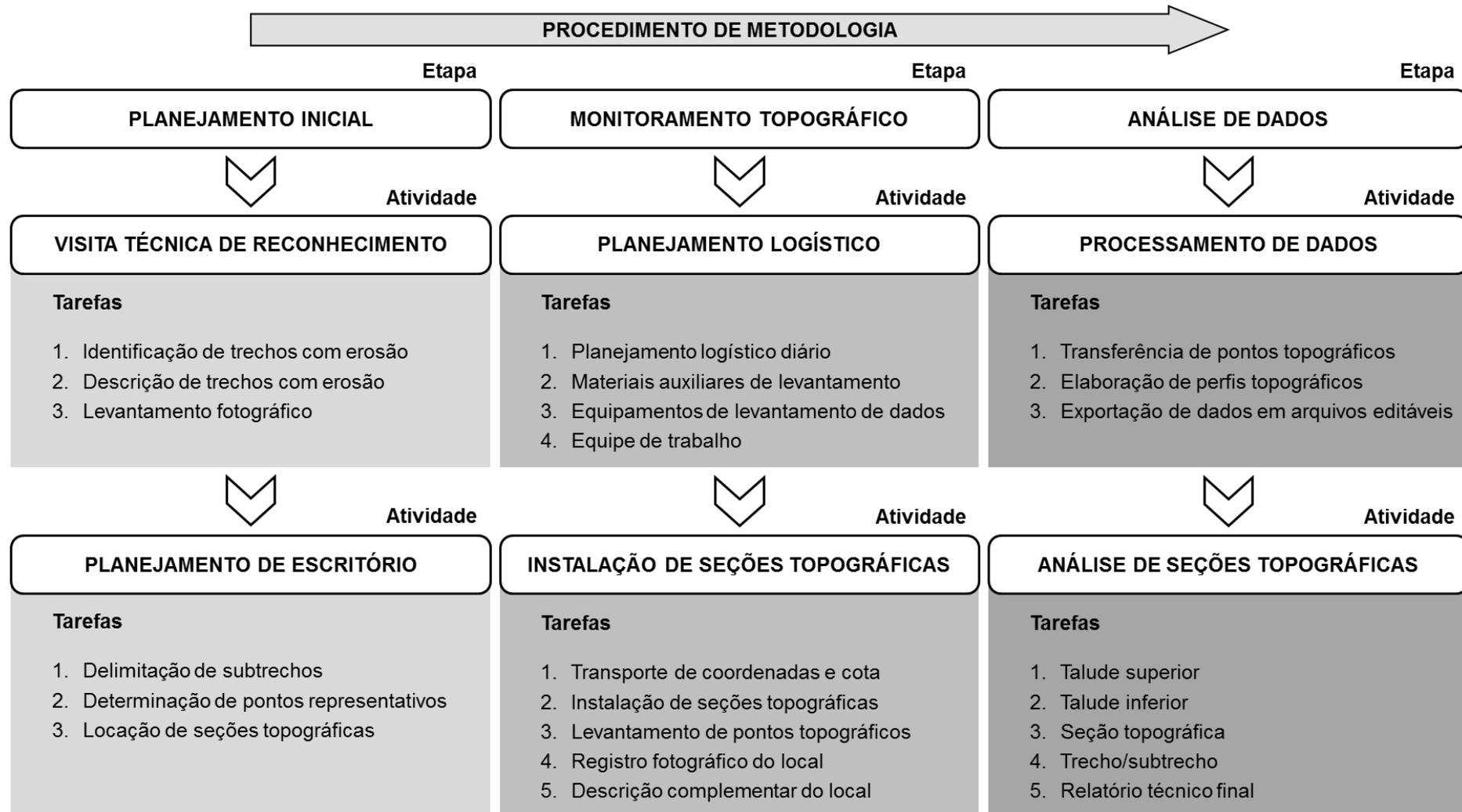
Fonte: O autor.

### 3.2.4 Fluxograma geral

O objetivo deste capítulo foi apresentar uma nova metodologia de monitoramento de processos erosivos direto a campo considerando a dinâmica de reservatórios de água. Para tal foram apresentadas e descritas minuciosamente as três etapas principais que compõem a metodologia, bem como as atividades e tarefas envolvidas em cada uma delas.

No final de cada etapa foi apresentado um fluxograma parcial elencando todas as atividades e tarefas a serem executadas. A Figura 44 compila os três fluxogramas parciais apresentados anteriormente de forma cronológica e sequencial.

Figura 44 – Fluxograma geral da metodologia de monitoramento proposta.



Fonte: O autor.



## 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Definidas e descritas as etapas e as respectivas atividades no capítulo anterior, pretende-se apresentar na sequência a validação prática da metodologia proposta por meio de um estudo de caso.

A implantação da metodologia de monitoramento a campo foi supervisionada pelo autor desta dissertação e acompanhada pelo Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), bem como por um técnico preposto da empresa operadora da concessão da usina hidrelétrica.

### 4.1 LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE IMPLANTAÇÃO DA METODOLOGIA

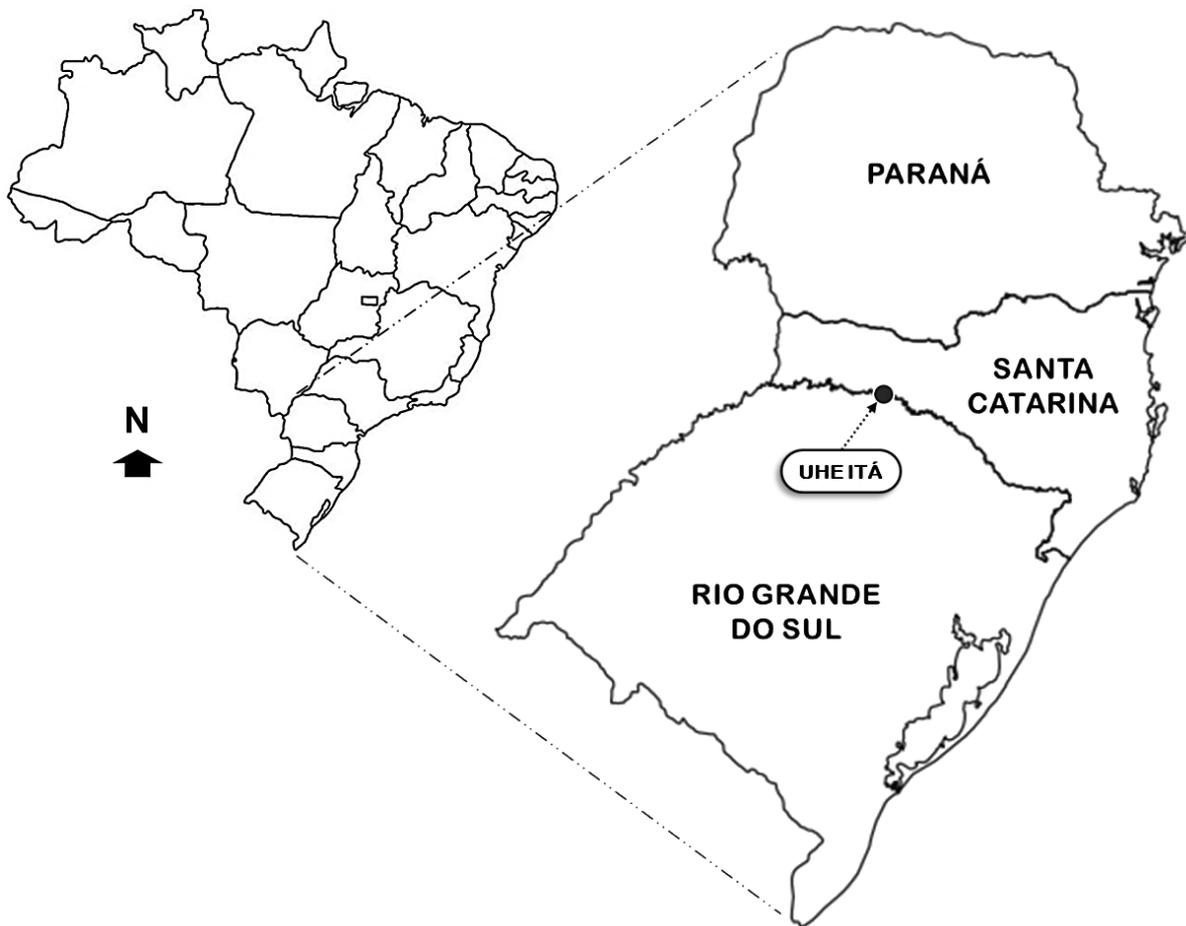
O local de aplicação da metodologia de monitoramento proposta foi a Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá). A usina encontra-se localizada no sul do Brasil, especificamente no trecho nacional do rio Uruguai que delimita geograficamente os estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) (Figura 45).

O consórcio da UHE Itá é formado por três empresas, nomeadamente Engie Brasil Energia, Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e Cimento Itambé. A empresa Engie Brasil Energia é a operadora da concessão da usina.

O barramento principal do empreendimento hidrelétrico está localizado próximo da curva do rio denominada de Volta do Uvã, entre os municípios de Itá (SC) e Aratiba (RS), nas coordenadas geográficas 27°16'39"S e 52°22'59"O. A barragem é constituída de enrocamento com face em concreto, possuindo altura máxima de 125 m, desde a base até o topo. O comprimento da estrutura na altura da crista é de 880 m e encontra-se situada a 375,5 m acima do nível do mar. O empreendimento possui dois vertedouros de superfície com capacidade de vertimento total de 49.940 m<sup>3</sup>/s (CONSÓRCIO ITÁ, 2001). A casa de força encontra-se localizada no município de Aratiba (RS), nas coordenadas 27°16'58"S e 52°23'26"O.

A construção da barragem principal e dos diques auxiliares resultou na formação de um reservatório com 141 km<sup>2</sup> de área superficial e 760 km de perímetro total. Este grande perímetro é decorrente do relevo acidentado e recortado da região, resultando na formação de grandes braços adjacentes e inúmeras extensões laterais ao corpo principal do reservatório.

Figura 45 – Localização da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá) na região sul do Brasil.



Fonte: O autor.

O nível máximo normal do reservatório situa-se a 370 m acima do nível do mar. A amplitude de oscilação do nível do reservatório é de aproximadamente 6 m, de modo que o nível mínimo de operação situa-se a 364 m acima do nível do mar.

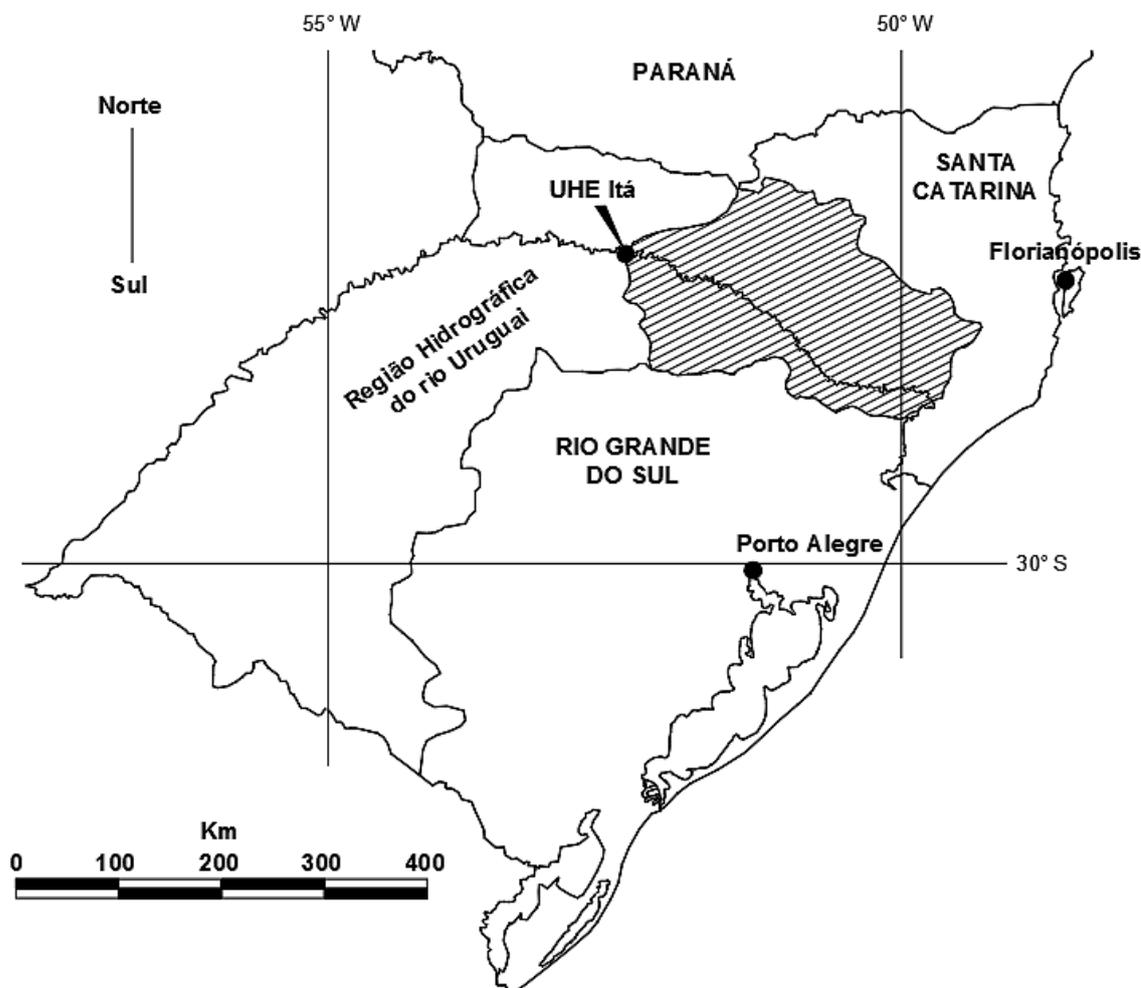
Com base nas características apresentadas, a UHE Itá possui capacidade de geração instalada de 1.450 MW. Esta produção de energia representa o abastecimento de 61% da demanda total do estado e Santa Catarina e 31% do estado do Rio Grande do Sul (PAIM; ORTIZ, 2006).

Os municípios de abrangência do reservatório da UHE Itá são: Aratiba, Marcelino Ramos, Mariano Moro e Severiano de Almeida no estado do Rio Grande do Sul; e Alto Bela Vista, Arabutã, Concórdia, Ipira, Itá, Peritiba e Piratuba no estado de Santa Catarina (CONSÓRCIO ITÁ, 2001).

A bacia de contribuição da UHE Itá (Figura 46) abrange importantes rios regionais, dentre os quais se destacam o rio Jacutinga, o rio do Peixe e o rio

Canoas, em Santa Catarina; e o rio Forquilha e o rio Pelotas, no Rio Grande do Sul (ELETROBRAS, 2017).

Figura 46 – Localização e bacia de contribuição da Usina Hidrelétrica de Itá UHE Itá.

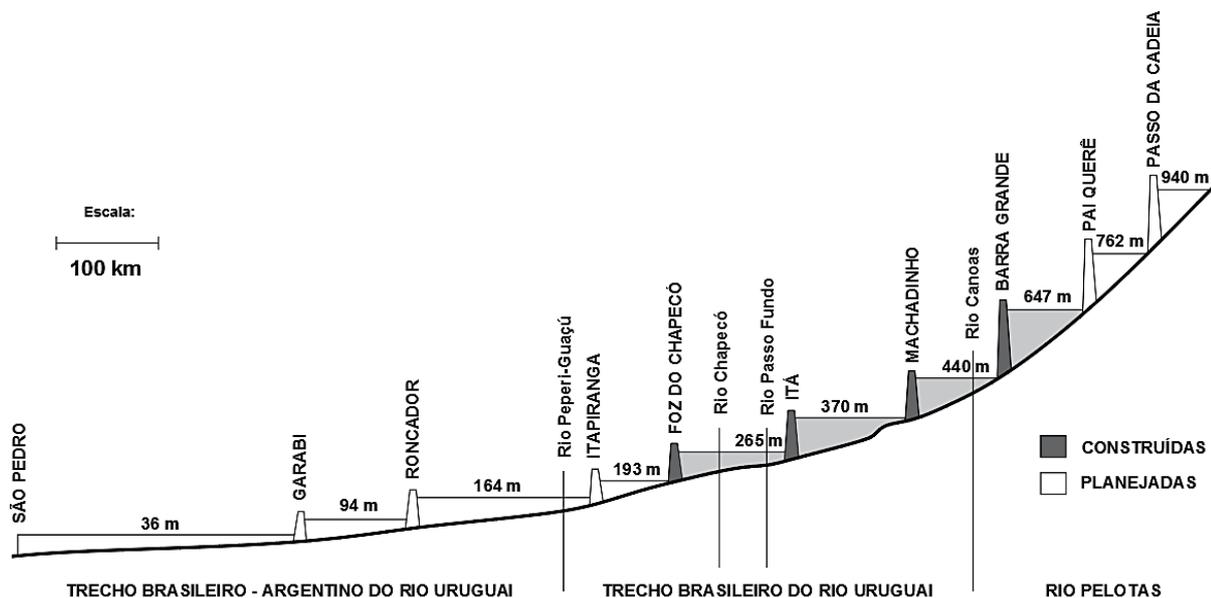


Fonte: Adaptado de ELETROBRAS (2017).

A inclinação longitudinal e a predominância de vales encaixados na cabeceira do rio Uruguai e de seus afluentes faz com que esta região seja bastante atraente do ponto de vista de geração de energia elétrica. Desta forma, a montante da UHE Itá encontram-se outras usinas importantes e em operação, dentre as quais se destaca a UHE Machadinho (rio Uruguai), UHE Barra Grande (rio Pelotas), UHE Campos Novos e UHE Garibaldi (rio Canoas).

A jusante da UHE Itá está localizada a UHE Foz de Chapecó (PAIM; ORTIZ, 2006), como pode ser observado na Figura 47.

Figura 47 – Perfil longitudinal do rio Uruguai e localização da UHE Itá.



Fonte: Adaptado de PAIM; ORTIZ (2006).

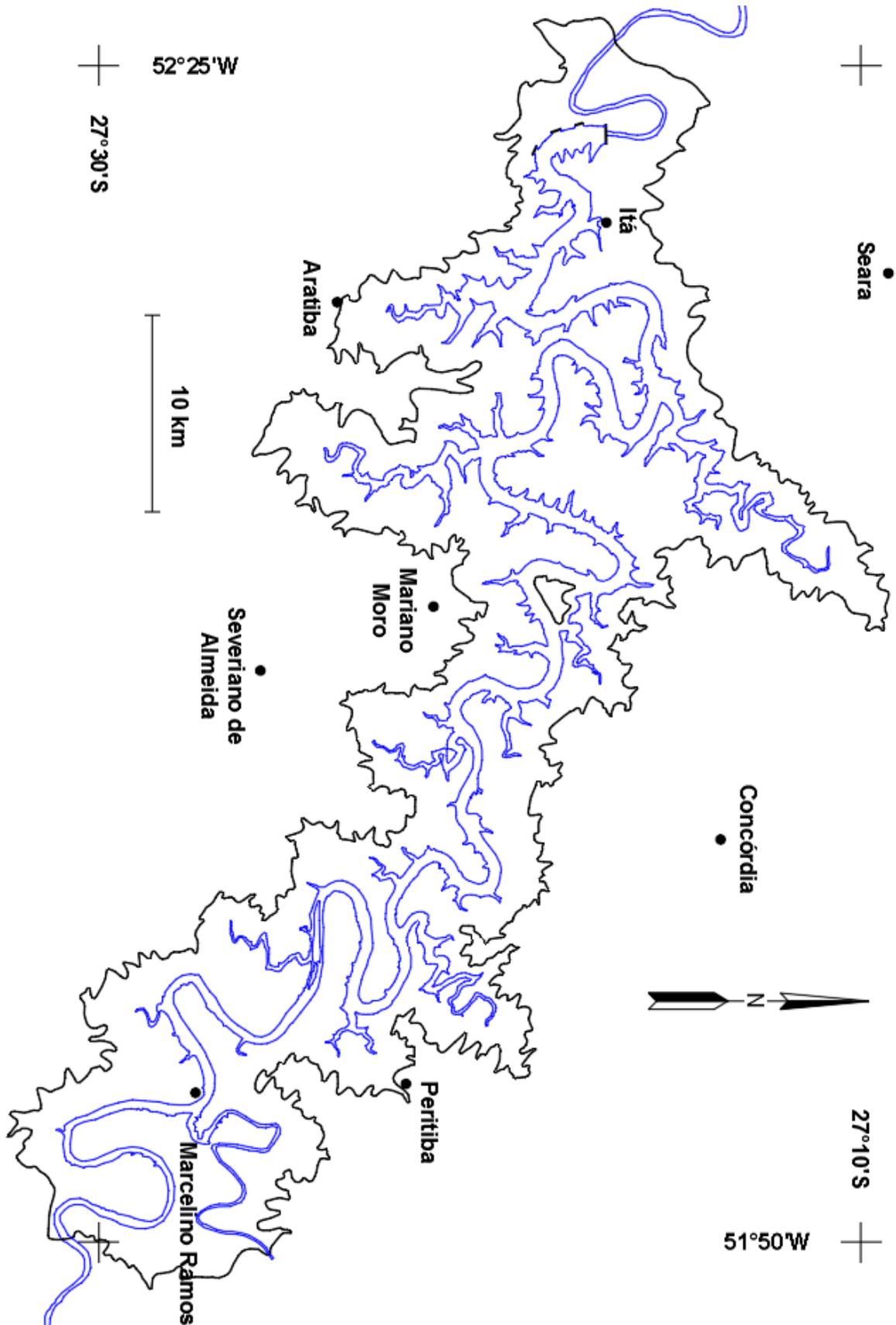
Além destes, outros grandes empreendimentos hidrelétricos como Pai Querê, Passo da Cadeia, São Roque, Itapiranga, Roncador, Garabi e São Pedro têm sua execução planejada ou estão em fase de construção (ELETROBRAS, 2017).

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MARGENS DO RESERVATÓRIO DA UHE ITÁ

Conforme apresentado anteriormente, o reservatório da UHE Itá possui 141 km<sup>2</sup> de espelho de água e 760 km de perímetro total de margens. O eixo do reservatório, considerando a calha original do rio Uruguai, possui aproximadamente 139 km de comprimento. Como a distância em linha reta entre o barramento principal e o final do reservatório é de aproximadamente 55 km, o índice de sinuosidade do trecho analisado é de 2,53, o que equivale a uma fisionomia meandrante tortuosa.

A grande tortuosidade do rio Uruguai no trecho considerado é resultante das escavações do fluxo ao longo das zonas de fraquezas do maciço basáltico (CNEC, 1988a), acarretando na formação de vales profundos, encaixados e de vertentes com considerável inclinação. A Figura 48 apresenta o perímetro do reservatório bem como a área diretamente afetada pelo empreendimento em questão.

Figura 48 – Perímetro do reservatório (azul) e área diretamente afetada (preto).



Fonte: Adaptado de CNEC, (1988b).

Os principais cursos de água que desaguam diretamente no reservatório da UHE Itá são o rio Jacutinga, o rio Rancho Grande e rio do Peixe no estado de Santa Catarina (SC); e rio Novo, rio Dourado, rio Lambedor, rio Suzana e rio Apuaê ou Ligeiro no estado do Rio Grande do Sul (RS).

A análise técnica prévia de estabilidade das encostas realizada durante os estudos de viabilidade do empreendimento revelaram que a espessura do solo é reduzida, variando geralmente até no máximo 10 m de profundidade. Em ocasiões específicas esta camada pode atingir até 15 m (CNEC, 1988).

Os cálculos dos fatores de segurança calculados para diferentes locais em todo o entorno do reservatório classificam 30% das encostas como estáveis ( $\alpha < 15^\circ$ ); 30% como passíveis de apresentar instabilidades ( $15^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ) e 40% como instáveis ou potencialmente instáveis ( $\alpha > 20^\circ$ ). As três classes de estabilidade ocorrem distribuídas ao longo do reservatório, embora uma maior proporção de encostas instáveis ou potencialmente instáveis incida nas proximidades do barramento principal (CNEC, 1988).

Os solos frequentemente encontrados nas bordas do reservatório são de constituição argilosa com baixa permeabilidade (CNEC, 1988) que, com frequência, apresentam blocos de rocha resistentes ao intemperismo imersos no perfil morfológico. O levantamento semidetalhado realizado antes da construção da barragem na área diretamente afetada pelo reservatório identificou os seguintes tipos de solos (CNEC, 1988):

- Latossolo Bruno Intermediário para Latossolo Roxo álico, horizonte A moderado de textura muito argilosa em relevo suave ondulado;
- Terra Bruna Estruturada Intermediária para Terra Roxa Estruturada (Nitossolo) eutrófica, horizonte A moderado, de textura muito argilosa com ocorrência em relevo suave a fortemente ondulado, presença de fase pedregosa;
- Cambissolo distrófico e eutrófico com argila de atividade baixa, horizonte A moderado e textura muito argilosa em relevo suave ondulado e ondulado;
- Cambissolo eutrófico com argila de atividade baixa até alta, horizonte A chernozêmico e moderado e textura argilosa a muito argilosa podendo conter fase pedregosa em relevo suave ondulado até fortemente ondulado;

- Cambissolo eutrófico e distrófico com argila de atividade baixa e alta, horizonte A chernozêmico e moderado com textura argilosa a muito argilosa com fase pedregosa e cascalhenta em relevo forte ondulado ou montanhoso.

A presença de inúmeros maciços rochosos intactos também é verificada ao longo das duas margens do reservatório, embora de forma menos frequente.

A Figura 49 apresenta a conformação das margens bem como as características típicas do material encontrado ao longo do reservatório da UHE Itá.

Os taludes superiores e inferiores do reservatório da usina de Itá geralmente não apresentam cobertura vegetal. Em casos de baixa declividade do talude inferior, algumas espécies herbáceas e arbustivas conseguem colonizar de forma espontânea e temporária esta faixa de talude enquanto o reservatório se encontra em uma cota baixa. A inexistência de vegetação nestes segmentos do terreno é motivada pela oscilação sazonal do nível de operação do reservatório e do efeito erosivo das ondas. De modo geral, este efeito é recorrente em reservatórios de usinas hidrelétricas.

Embora o nível do reservatório permaneça poucos dias do ano em sua cota máxima (370 m), o efeito de inundação temporária impede a colonização espontânea e definitiva da vegetação herbácea e arbustiva ao longo de uma pequena faixa do talude inferior. Isto decorre do fato desta vegetação não suportar zonas de inundação permanente, mesmo que temporária, pela ausência de características adaptativas favoráveis para sobrevivência neste tipo de ambiente.

No entanto, outro agravante ao estabelecimento de vegetação está relacionado ao efeito de embate constante das ondas sobre os taludes. O efeito de solapamento e remoção de solo pelas ondas se dá constantemente e atua ao longo de todo o talude inferior na medida em que a oscilação do nível do reservatório varia. Com as constantes subidas e descidas do nível, cuja velocidade e amplitude é típica de cada reservatório, a água desestrutura e movimenta o solo das cotas mais altas para as cotas mais baixas e para dentro do reservatório, o que prejudica o desenvolvimento da vegetação nessas porções do talude.

Além da retirada da camada superficial mais fértil do solo, as ondas também contribuem para a remoção mecânica da vegetação instalada, resultando em taludes inferiores completamente desprovidos de cobertura vegetal.

Figura 49 –Diferentes tipos de margens encontradas no perímetro do reservatório da UHE Itá.



### 4.3 VALIDAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA PROPOSTA

Nesta seção será apresentada a validação prática da metodologia proposta, especificamente a execução das três etapas e suas atividades e tarefas vinculadas, as quais foram descritas no capítulo 3 e compiladas na Figura 44.

A aplicação prática desta metodologia foi executada pelo autor desta dissertação e por corpo técnico de empresa especializada em topografia, a qual foi devidamente contratada pela empresa operadora da concessão da UHE Itá.

#### 4.3.1 Planejamento inicial – Visita técnica de reconhecimento

A aplicação da metodologia iniciou em outubro de 2017 mediante visita técnica de reconhecimento do reservatório da UHE Itá. Na ocasião foi percorrido todo o perímetro do reservatório (760 km) em três dias consecutivos, com o objetivo de identificar os trechos de margem afetados pela erosão lacustre.

O deslocamento via lacustre foi realizado com barco motorizado com capacidade de carga de quatro passageiros. A embarcação foi conduzida por barqueiro devidamente habilitado e a visita ao reservatório foi devidamente autorizada por parte da empresa operadora da concessão da usina.

A visita técnica foi realizada por dois colaboradores do Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) e pelo responsável técnico da empresa de topografia contratada pela empresa operadora da concessão para a execução do levantamento topográfico posterior a campo.

A demarcação do início e final de cada trecho com erosão foi realizada com um sistema GPS de navegação por meio da coleta de coordenadas geográficas tomadas a partir do barco posicionado próximo da margem. Esta atividade foi executada pelo responsável técnico da empresa de topografia.

A identificação dos trechos com erosão se deu a partir de análise visual das margens. Os critérios que foram considerados são a altura do talude superior, a ocorrência visível de perda de solo recente na forma de pequenos deslizamentos ou tombamentos e a ausência de vegetação nos taludes superiores e inferiores.

Ao término da visita ao reservatório foram identificados 39 trechos com processos erosivos, os quais somam aproximadamente 24 km de margem (3,2% do perímetro total do reservatório). Apesar de ter sido verificada a ocorrência de

processos erosivos em outros trechos, foram apenas selecionados aqueles onde o processo erosivo era mais acentuado. O Apêndice C apresenta os trechos identificados e os respectivos comprimentos de margem, bem como sua localização.

A numeração dos trechos foi realizada do sentido de jusante (barragem) para montante (final do reservatório). Na margem esquerda (ME) foram identificados 23 trechos com erosão (11,4 km) e na margem direita (MD) 16 trechos (12,4 km).

As coordenadas métricas UTM de início e final de cada trecho, agora já em atividade de escritório, foram devidamente descarregadas em computador e carregadas no aplicativo *Google Earth Pro*<sup>®</sup> pelo responsável técnico da empresa de topografia. Na sequência foi determinado o comprimento de margem compreendido entre os pontos topográficos de início e final (pontos circulares) de cada trecho através de ferramentas de medição do próprio aplicativo (Figura 50). O comprimento de cada segmento, bem como as coordenadas de localização do ponto inicial e final de cada trecho pode ser observado no Apêndice C.

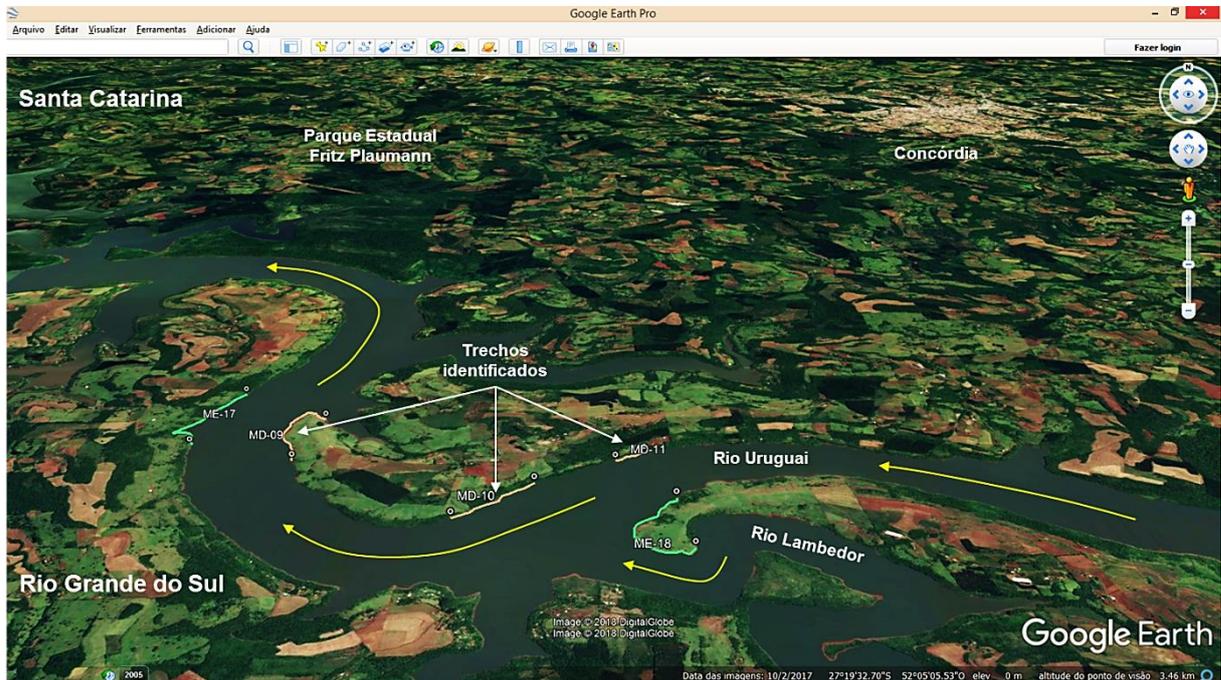
Após a devida organização e identificação de todos os trechos foi gerado um arquivo digital (.kmz) e disponibilizado aos responsáveis pelo desenvolvimento da metodologia de monitoramento. Este arquivo serviu de base para o planejamento e execução de atividades posteriores, conforme será relatado a seguir.

Durante a visita técnica também foi realizada a descrição dos trechos com erosão, que consistiu na coleta de informações gerais e relativas às características das margens para uso no planejamento de atividades posteriores.

Todas as informações foram coletadas a partir do barco posicionado nas proximidades da margem. Os dados coletados visaram descrever, de forma geral, o estado atual de cada trecho cadastrado, considerando aspectos técnicos e sociais. Todas as variáveis coletadas a campo estão compiladas na ficha técnica descritiva de trechos com erosão que se encontra no Apêndice A.

Paralelo à descrição também foi realizado o levantamento fotográfico de cada trecho cadastrado. Para tal foram tomadas fotografias sequenciais a partir do barco em movimento em posição frontal à margem. Ou seja, foram obtidas fotografias desde o início até o final de cada trecho, distanciadas poucos metros umas das outras, de modo que se obtivesse um registro minucioso da margem.

Figura 50 – Imagem orbital com alguns trechos identificados com erosão na margem direita (cor laranja) e margem esquerda (cor verde) no reservatório da UHE Itá.



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH PRO (2018).

O registro fotográfico detalhado de cada trecho foi primordial para complementação e corroboração das informações coletadas pela ficha técnica descritiva, além de ter desempenhado função essencial no planejamento de atividades subsequentes da metodologia.

#### 4.3.2 Planejamento inicial – Planejamento de escritório

A partir dos dados coletados na visita de reconhecimento do reservatório foi realizada a divisão dos trechos em subtrechos, a escolha de pontos representativos em cada subtrecho e a locação de seções topográficas.

A divisão dos trechos em subtrechos levou em consideração os fatores de tipo de solo, presença ou ausência de blocos de rocha nos taludes e a inclinação do talude superior e talude inferior. Esta divisão foi realizada toda vez que se verificava mudança de um ou mais destes fatores, conforme descrito no item 3.2.1.2 e apresentado na Figura 24.

A determinação propriamente dita do início e final de cada subtrecho foi realizada por meio da análise conjunta do registro fotográfico obtido durante a

atividade de reconhecimento das margens do reservatório e do arquivo digital do *Google Earth Pro*<sup>®</sup> (formato .kmz fornecido pela empresa de topografia) contendo todos os trechos. A partir da análise das fotografias sequenciais obtidas das margens identificaram-se os pontos a partir dos quais as condições fisionômicas de cada trecho eram divergentes. Na sequência, estes pontos foram identificados e representados na imagem orbital contida no arquivo digital, delimitando cada subtrecho.

Para o caso prático em questão, todos os trechos identificados foram subdivididos, resultando em um total de 150 subtrechos em todo o reservatório. O número de subtrechos (e seções topográficas) pertencentes a cada trecho pode ser verificado no Apêndice C.

Findada a divisão dos trechos realizou-se a escolha de pontos representativos em cada subtrecho. Conforme descrito no item 3.2.1.2, a determinação destes pontos foi realizada de tal forma que fossem representativos das características fisionômicas de cada subtrecho. A representatividade destes pontos é importante, pois é nestes pontos onde serão instaladas posteriormente as seções topográficas de monitoramento.

Os fatores considerados na determinação dos pontos representativos foram principalmente a altura do talude superior e as condições de solo do talude superior e talude inferior. Estes fatores, principalmente a altura do talude superior, são importantes de serem considerados, pois servem de indicativo da suscetibilidade de perda de solo do local e, portanto, à representatividade do subtrecho como um todo.

A determinação dos pontos representativos foi realizada mediante análise do registro fotográfico de cada trecho/subtrecho. Na medida em que os pontos foram definidos em cada subtrecho, a sua localização geográfica foi devidamente identificada e representada na imagem orbital contida no arquivo digital (*Google Earth Pro*<sup>®</sup>). Após determinação de todos os pontos, o arquivo digital foi novamente disponibilizado para a empresa de topografia contratada, de modo que pudesse ser iniciado o planejamento logístico necessário à execução da etapa de monitoramento topográfico a campo.

Como descrito no item 3.2.1.2, a localização geográfica de cada ponto representativo do subtrecho foi assumida como o ponto no terreno a receber a instalação de uma seção topográfica de monitoramento. Como descrito anteriormente, da divisão dos 39 trechos totais identificados resultaram 150

subtrechos, o que significa dizer que serão instaladas 150 seções topográficas em todo o reservatório.

#### **4.3.3 Monitoramento topográfico – Planejamento logístico**

A atividade de planejamento logístico inerente ao levantamento compreende o planejamento diário de deslocamento e medições, bem como o dimensionamento dos materiais, equipamentos e mão de obra necessária à coleta de dados a campo. Este planejamento foi realizado exclusivamente pela empresa de topografia contratada, já que a responsabilidade de implantação das seções topográficas e coleta de dados a campo foi delegado a esta através de contrato de serviço firmado com a empresa operadora da concessão da usina.

A partir da análise da localização geográfica dos trechos e das seções topográficas contidas no arquivo digital (.kmz) pela empresa de topografia, iniciou-se o levantamento dos portos e a localização dos marcos da RVG distribuídos ao longo da margem esquerda e margem direita do reservatório.

No total foram selecionados seis portos distribuídos estrategicamente ao longo da margem direita (Santa Catarina) do reservatório para visitação de todos os locais alvos de monitoramento. A localização dos portos e dos marcos da RVG pode ser observada na Tabela 1 e Figura 51.

Quanto à instalação e coleta de dados da primeira campanha de medição, a empresa de topografia adotou a estratégia de executar o levantamento das seções topográficas de montante (final do reservatório) para jusante (barragem da UHE Itá). Desta forma, os portos de acesso ao reservatório foram visitados sequencialmente, de montante para jusante, durante os dias do levantamento.

A organização e o dimensionamento dos materiais auxiliares necessários ao levantamento foram executados pela empresa de topografia. Para o deslocamento via lacustre foi utilizado um barco motorizado (40 HP) com capacidade de transporte de 4 pessoas, além de espaço extra para transporte de materiais. A condução da embarcação ficou a cargo do responsável técnico da empresa de topografia, que é devidamente habilitado pela Autoridade Marítima.

Para a implantação das seções topográficas foram utilizados piquetes e estacas de madeira. As dimensões aproximadas dos piquetes são 3,0 x 3,0 x 15,0

cm e das estacas 2,5 x 5,0 x 50,0 cm. A cravação dos piquetes e estacas foi realizada com marreta de 5 kg.

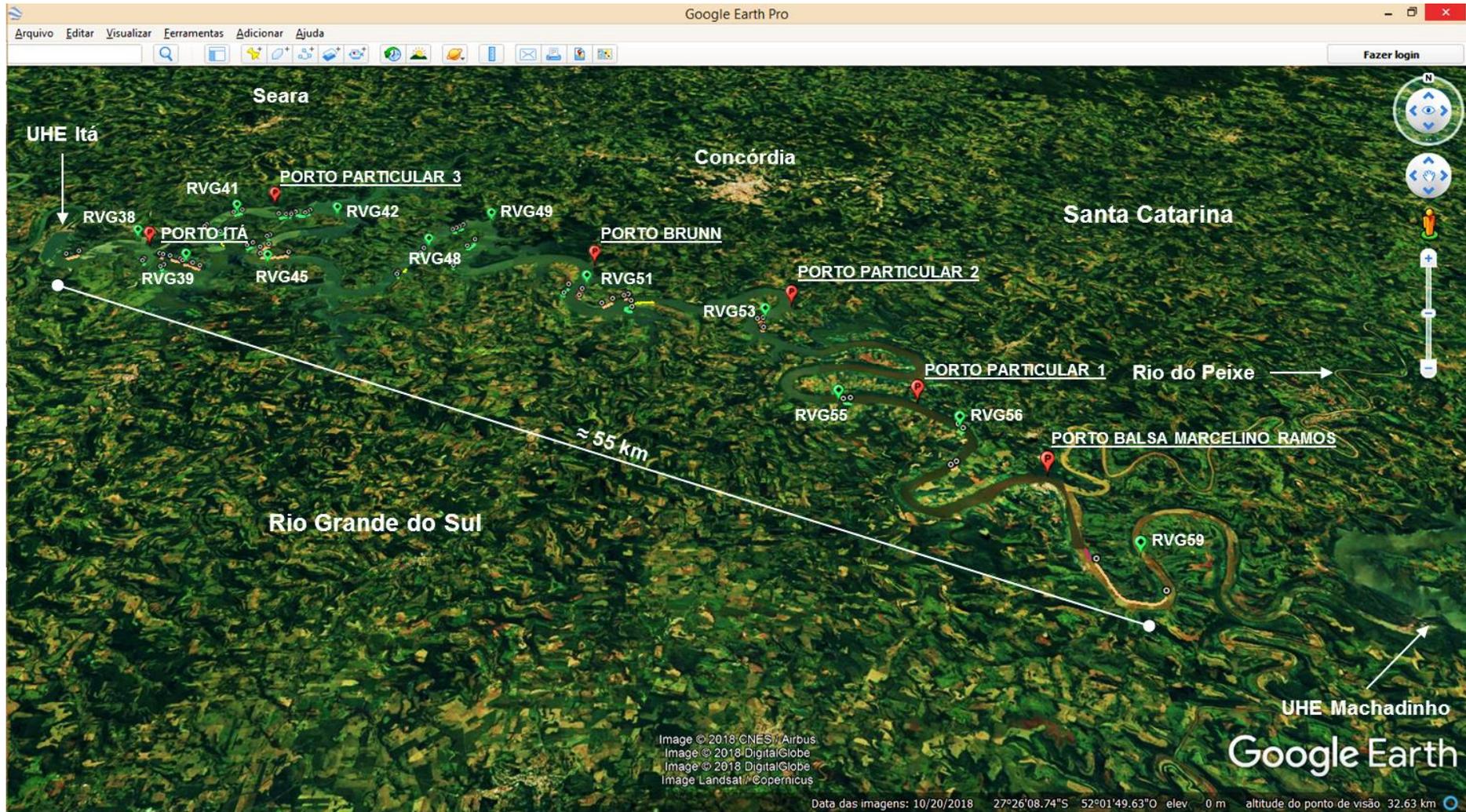
Tabela 1 – Localização geográfica dos portos utilizados durante o monitoramento para acesso do barco ao reservatório.

<b>Portos</b>	<b>Latitude (S)</b>	<b>Longitude (O)</b>
Porto Balsa Marcelino Ramos	27°27'25''	51°54'23''
Porto particular 1	27°24'48''	51°57'10''
Porto particular 2	27°20'39''	52°00'16''
Porto Brunn	27°18'36''	52°06'07''
Porto particular 3	27°15'08''	52°16'50''
Porto Itá	27°17'28''	52°19'58''
<b>Marcos da RVG</b>	<b>Latitude (S)</b>	<b>Longitude (O)</b>
RVG38	27°17'08''	52°20'28''
RVG39	27°18'28''	52°18'27''
RVG41	27°15'40''	52°17'53''
RVG42	27°15'51''	52°14'37''
RVG45	27°18'34''	52°15'58''
RVG48	27°17'42''	52°11'17''
RVG49	27°16'14''	52°09'37''
RVG51	27°19'41''	52°06'14''
RVG53	27°21'17''	52°01'02''
RVG55	27°24'48''	51°59'13''
RVG56	27°25'48''	51°56'14''
RVG59	27°29'55''	51°52'50''

Fonte: O autor.

Os trabalhos de limpeza necessários em alguns locais de implantação das seções topográficas ou em torno dos marcos da RVG foram realizados com foice.

Figura 51 – Localização dos portos, marcos da RVG e trechos com erosão alvos de monitoramento no reservatório da UHE Itá.



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH PRO (2018).

Os equipamentos utilizados para a localização e levantamento de seções topográficas foram sistema GPS de navegação, sistema RTK e estação total. O sistema GPS de navegação foi utilizado durante o deslocamento no reservatório para acesso aos marcos da RVG e aos locais de instalação das seções topográficas. Os locais previamente carregados no GPS foram obtidos a partir do arquivo digital (.kmz) elaborado durante o planejamento de escritório.

O modelo de sistema GPS de navegação utilizado foi *Garmin eTrex*. O levantamento das seções topográficas foi realizado com o conjunto de receptores RTK (estação base e estação móvel) e estação total e mira (prisma). O modelo RTK utilizado foi *GNSS South S86* e o modelo de estação total foi *TOPCON GPT 3005*. A Figura 52 apresenta os três equipamentos utilizados durante o levantamento e apresenta algumas características técnicas de cada um deles.

Figura 52 – Equipamentos utilizados durante o levantamento topográfico a campo.

EQUIPAMENTOS	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS
Garmin eTrex 	<p><b>GPS Garmin eTrex Venture HC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Memória: 24 MB</li> <li>• Duração da bateria: 14 horas (2 baterias AA)</li> <li>• Favoritos/locações: 500; Rotas: 50</li> <li>• Interface: USB</li> <li>• Capacidade de pontos: 10000; Caminhos salvos: 10</li> </ul>
GNSS South S86 	<p><b>GNSS SOUTH S86 NEW RTK</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Levantamento estático horizontal: <math>\pm 2,5</math> mm + 0,5 ppm</li> <li>• Levantamento estático vertical: <math>\pm 5</math> mm + 0,5 ppm</li> <li>• Levantamento cinemático horizontal: <math>\pm 8</math> mm + 1 ppm</li> <li>• Levantamento cinemático vertical: <math>\pm 15</math> mm + 1 ppm</li> <li>• Faixa de frequência: 410 – 470 MHz</li> </ul>
Topcon GPT 3005 	<p><b>Estação total TOPCON, GPT-3005W (Wireless/Bluetooth)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leitura direta de 1" e precisão de 5"</li> <li>• Precisão linear de 3 mm + 2 ppm</li> <li>• Alcance de 3000 m com 1 prisma e 250 m sem prisma</li> <li>• Memória: 16000 pontos de coordenadas</li> <li>• Compensador no eixo vertical e horizontal</li> </ul>

Em relação à equipe de trabalho, foram mobilizados três colaboradores da empresa de topografia para execução de todos os serviços inerentes ao levantamento, cada um com funções e responsabilidades específicas. Este quantitativo de mão de obra se mostrou adequado para este tipo de levantamento topográfico, considerando as várias atividades inerentes e de execução simultânea. Além disso, este quantitativo também permitiu maior agilidade de deslocamento no reservatório pela adequação da carga ao barco utilizado.

#### **4.3.4 Monitoramento topográfico – Instalação de seções topográficas**

A instalação de seções topográficas, bem como a coleta de pontos topográficos da primeira campanha de monitoramento foi realizada conforme descrito em detalhe no item 3.2.2.2. O monitoramento topográfico foi executado em janeiro de 2018 pela empresa de topografia mediante acompanhamento técnico do autor desta dissertação.

Com a ajuda do sistema GPS de navegação, primeiramente foram acessados os marcos da RVG distribuídos ao longo das margens do reservatório para instalação da estação base do sistema RTK, conforme descrito no item 3.2.2.2. Após instalação e configuração da estação base e da estação móvel, foram acessados os subtrechos localizados na zona de alcance do sinal transmitido pela estação base. Quando a qualidade e a intensidade do sinal diminuía, a estação base era reinstalada sobre o próximo marco da RVG próximo dos subtrechos a monitorar, no sentido de montante para jusante do reservatório.

O acesso aos subtrechos e seções topográficas foi realizado com a ajuda do sistema GPS de navegação, que continha as coordenadas de localização dos locais previamente definidos na fase de planejamento de escritório.

Após acesso ao local, cada seção topográfica foi materializada e identificada a campo através de um piquete e estaca de madeira, respectivamente. No topo do piquete (marcado com prego) era posicionada a estação móvel e realizado o transporte de coordenadas geográficas (X, Y) e cota altimétrica (Z) (Figura 34).

Em seguida era determinado o alinhamento ortogonal da seção topográfica em relação à linha de água do reservatório e às curvas de nível do terreno (Figura 33).

Após definição do alinhamento da seção topográfica foi realizada a coleta de pontos topográficos com estação móvel (RTK) e estação total. A estação total era devidamente instalada sobre o piquete de madeira (Figura 35) e os pontos devidamente coletados sobre a seção topográfica. De forma simultânea também eram coletados pontos sobre a mesma seção topográfica com a estação móvel, de modo a otimizar o tempo de levantamento por seção (Figura 37 A).

A coleta de pontos sobre os três segmentos do terreno foi realizada minuciosamente e conforme apresentado na Figura 36 e Figura 37. Após término da coleta de pontos em cada seção topográfica, os equipamentos eram recolhidos e o próximo local de monitoramento era acessado, repetindo-se novamente o procedimento de monitoramento descrito. Na segunda campanha de monitoramento, a qual ocorreu em dezembro de 2018, foram utilizadas as mesmas técnicas e equipamentos utilizados na primeira campanha. Os mesmos procedimentos deverão também ser adotados nas demais campanhas a serem executadas, de modo a padronizar o levantamento de dados a campo.

Na primeira campanha de levantamento de dados foram necessários sete dias úteis de trabalho para levantamento das 150 seções (22 seções/dia, em média) distribuídas em 39 trechos em todo o reservatório (Apêndice C). O número de dias necessários poderia ter sido menor, caso inúmeras interrupções das atividades não tivessem que ser realizadas em virtude de chuvas temporárias (Janeiro de 2018).

Todo o procedimento de acesso aos marcos da RVG, o transporte de coordenadas e cota, a instalação de seções e detalhes do levantamento de pontos pode ser consultado em maiores detalhes no item 3.2.2.2 e nas ilustrações complementares.

Para cada seção topográfica foi realizado um levantamento fotográfico e um levantamento descritivo detalhado do local (Apêndice A). Estas informações complementam os dados obtidos pelo monitoramento topográfico e contribuem para o entendimento do comportamento dos processos erosivos a serem analisados posteriormente (conforme descrito no item 3.2.3.2).

#### **4.3.5 Análise de dados – Processamento de dados**

A atividade de processamento de dados foi executada em escritório por um especialista em geoprocessamento da empresa de topografia. Os trabalhos

executados consistiram na transferência dos dados brutos coletados pelos equipamentos de topografia para o computador, o processamento e a elaboração de perfis topográficos de cada local monitorado em *software* específico de análise topográfica (*TopograPH*) e a exportação dos dados processados em arquivos editáveis (.dwg, .xls e .kmz), conforme descrito no item 3.2.3.1.

Após processamento e exportação, os dados foram disponibilizados ao autor da dissertação e à empresa operadora da concessão da usina.

Os dados disponibilizados foram os perfis topográficos em formato .dwg para análise em *software* de desenho assistido por computador, os dados individualizados de localização de cada seção topográfica e dos respectivos pontos coletados sobre a mesma em planilha compatível com o *Microsoft Excel* (.xls) (conforme modelo do Apêndice B) e o arquivo digital compatível com o *Google Earth Pro*<sup>®</sup> (.kmz) com as seções topográficas e os respectivos pontos coletados sobre cada uma delas. A Figura 53 (obtida do arquivo digital .kmz) apresenta os pontos coletados sobre as seções topográficas de dois trechos monitorados na margem esquerda (ME-06 e ME-05) do reservatório da UHE Itá.

Figura 53 – Pontos coletados sobre as seções topográficas dos trechos ME-06 (S104 e S105) e ME-05 (S106 a S112) localizados na margem esquerda.



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH PRO (2018).

#### 4.3.6 Análise de dados – Análise de seções topográficas

Nesta atividade foi realizada a análise dos processos erosivos observados em alguns taludes. Como relatado anteriormente, a análise do comportamento da erosão lacustre em um determinado local é possível pela análise dos perfis topográficos obtidos a partir de duas campanhas sucessivas de monitoramento.

Desta forma, no dia 04.12.2018 foi realizada a segunda campanha de monitoramento de seções topográficas, aproximadamente 11 meses após a primeira campanha de medição. Na execução da segunda campanha de medição foram seguidos os procedimentos previstos na metodologia, da mesma forma como na primeira campanha. No entanto, devido ao nível do reservatório foram monitoradas apenas quatro seções topográficas como forma de subsidiar os dados para a validação da metodologia proposta. A segunda campanha de monitoramento de todas as seções topográficas deve ocorrer no início do ano de 2019 (Fevereiro - Março) quando o nível do reservatório se encontrar em uma cota mais baixa.

As quatro seções topográficas monitoradas na segunda campanha de monitoramento encontram-se localizadas na margem direita do reservatório e próximo do barramento principal, conforme pode ser observado na Figura 54.

As seções pertencem ao trecho MD - 01 localizado na margem direita do reservatório a aproximadamente 3 km a montante do barramento principal e aproximadamente 3 km a jusante da cidade de Itá (SC). O trecho MD - 01 apresenta 681 m de comprimento e possui 13 seções topográficas instaladas. O trecho caracteriza-se pela predominância de solo de constituição argilosa. O talude superior apresenta em média mais de 3 m de altura e encontra-se parcialmente recoberto por vegetação não lenhosa. O talude inferior apresenta grande quantidade de blocos de rocha com tamanhos variados, ora recobrendo densamente o talude, ora distribuídos isoladamente.

A Figura 55 apresenta a fisionomia característica dos subtrechos das seções topográficas (S139 a S142) utilizadas para análise dos processos erosivos entre campanhas sucessivas de monitoramento. As fisionomias apresentadas são representativas do trecho MD - 01 como um todo.

Figura 54 – Vista geral do trecho MD-01 contendo as seções topográficas utilizadas para avaliação de processos erosivos e validação da metodologia.



Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH PRO (2018).

Figura 55 – Fisionomia geral dos subtrechos de abrangência das quatro seções topográficas (S139 a S142) escolhidas para a análise dos processos erosivos após duas campanhas de monitoramento.



Fonte: O autor.

A localização geográfica das seções topográficas em questão pode ser observada na Tabela 2.

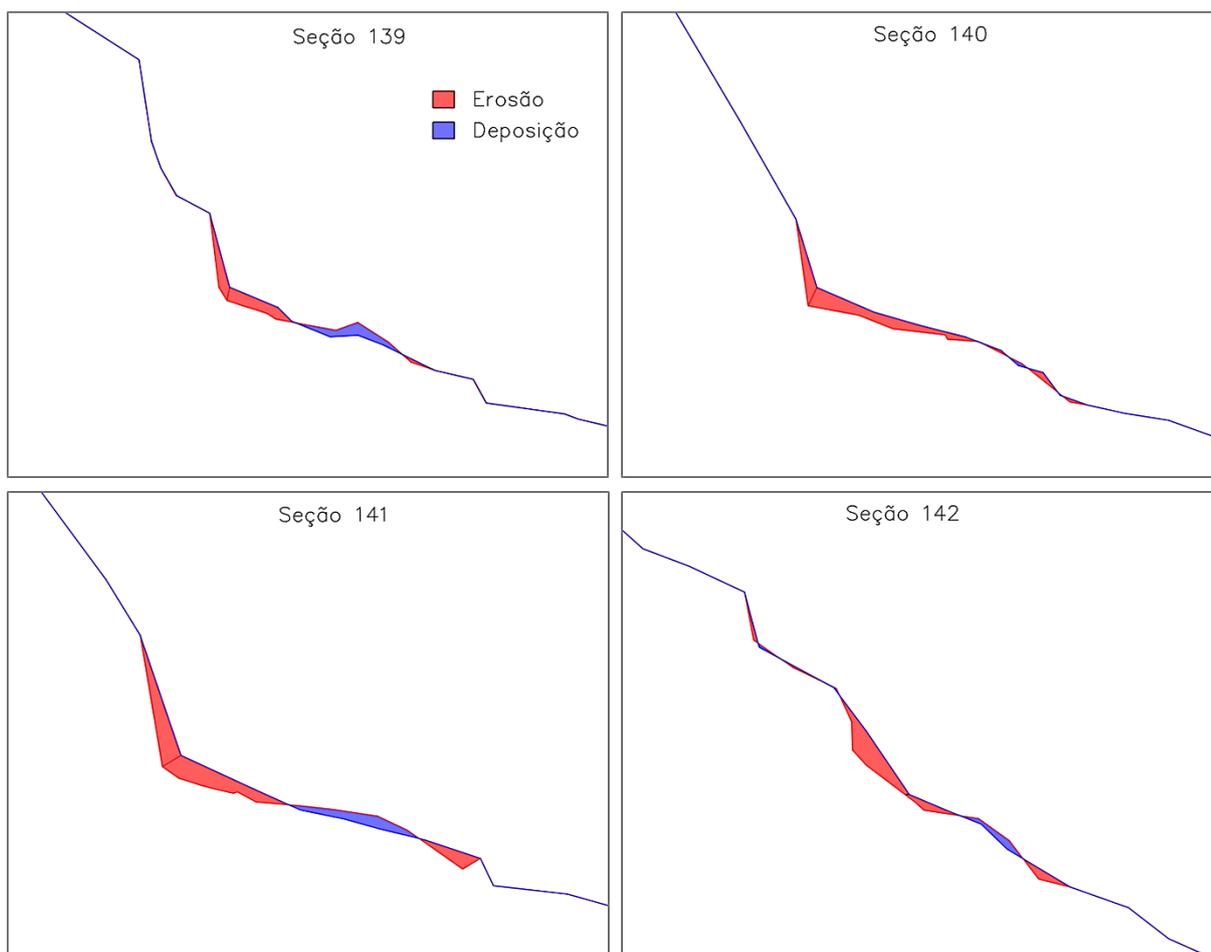
Tabela 2 – Localização geográfica das seções topográficas escolhidas na validação da metodologia.

Seção	Trecho	Coordenadas UTM	
		Latitude (m)	Longitude (m)
S139	MD-01	6.979.685,95	364.812,33
S140	MD-01	6.979.631,79	364.782,86
S141	MD-01	6.979.605,17	364.769,94
S142	MD-01	6.979.558,01	364.691,49

Fonte: O autor.

Após coleta de dados a campo e o processamento dos mesmos em escritório pela empresa de topografia, os perfis do terreno obtidos para cada seção topográfica são os apresentados na Figura 56. Os respectivos perfis em escala com distâncias horizontais e medidas de cota encontram-se detalhadamente representados no Anexo A.

Figura 56 – Perfis topográficos do terreno (sem escala) das quatro seções topográficas monitoradas.



Fonte: Adaptado de REAL TOPOGRAFIA LTDA (2018).

A apresentação e análise de dados que se seguirá são baseadas nestes perfis topográficos, levando em consideração a conformação original do terreno (linha azul) e a conformação atual (linha vermelha) 11 meses após a primeira campanha de monitoramento.

A Tabela 3 apresenta os dados de comportamento da erosão no talude superior para as seções analisadas. Os dados foram obtidos por meio de medição

direta das seções topográficas em *software* de desenho assistido por computador (*AutoCAD*®), bem como da aplicação de equações matemáticas elencadas e descritas no item 3.2.3.2 da metodologia proposta.

Tabela 3 – Análise do processo erosivo verificado nos taludes superiores das quatro seções topográficas consideradas.

Variáveis	Seções topográficas			
	S139	S140	S141	S142
Recuo da crista do talude ( $R_c$ ) (cm)	0	0	0	0
Taxa de recuo da crista do talude ( $i_{rc}$ ) (cm/ano)	0	0	0	0
Área erodida no talude ( $A_{e\ ts}$ ) (m <sup>2</sup> )	0,098	0,099	0,271	0,305
Área depositada no talude ( $A_{d\ ts}$ ) (m <sup>2</sup> )	0	0	0	0,009
Comprimento do talude ( $C_{ts}$ ) (m)	1,088	1,013	1,801	3,691
Recuo médio do talude ( $R_{m\ ts}$ ) (cm)	8,968	9,791	15,061	8,004
Intervalo de tempo (anos)	0,917	0,917	0,917	0,917
Taxa de recuo do talude ( $i_{r\ ts}$ ) (cm/ano)	9,783	10,681	16,430	8,732

Fonte: O autor.

Como pode ser observado, não se verificou recuo da crista do talude superior ( $R_c$ ) em ambas as seções em um intervalo de 11 meses entre campanhas de medição sucessivas. No entanto, houve corrosão de uma porção da base do talude, ocasionado em grande parte pelo embate direto das ondas enquanto o nível do reservatório esteve em sua cota máxima ou muito próximo disso. Esta constatação também foi verificada por Reid (1992) em pesquisas de recuos de margens realizados no reservatório Sakakawea, nos Estados Unidos.

Para o reservatório da UHE Itá em específico, o nível da água permaneceu 50 dias durante os 11 meses (330 dias) considerados entre campanhas sucessivas no intervalo entre a cota máxima e 20 cm abaixo dela. Este número de dias corresponde a aproximadamente 15% do tempo total considerado. Quando considerado o intervalo entre a cota máxima até 10 cm abaixo dela, o número de dias durante o mesmo período em que o nível da água esteve neste intervalo foi de 22 dias, correspondendo a aproximadamente 6,7% do tempo total.

Ainda neste sentido, Volker e Henry (1988) relatam que a velocidade e a amplitude de oscilação do nível do reservatório afetam diretamente as taxas de erosão nas margens, de modo que as maiores perdas de solo ocorrem em reservatórios que apresentam ciclos de cheia mais frequentes.

A tendência do avanço da corrosão da base do talude superior é produzir taludes instáveis que, após determinado tempo, poderão sofrer grandes perdas repentinas de solo na forma de deslizamentos. Esta informação só poderá ser confirmada para os locais analisados a partir das campanhas de monitoramento que ainda deverão ser executadas, ou seja, considerando um período de tempo maior.

A corrosão e perda de solo verificada na base do talude superior ( $A_{e\ ts}$ ) foram mais intensas na seção S142 (0,305 m<sup>2</sup>), seguida da seção S141 (0,271 m<sup>2</sup>). Já as seções S139 (0,098 m<sup>2</sup>) e S140 (0,099 m<sup>2</sup>) apresentaram valores muito parecidos, mas consideravelmente menores que as seções anteriores. As condições que resultaram em diferentes perdas de solo podem ser variadas. Algumas variáveis importantes e apresentadas no capítulo 2 são as características do solo, o *fetch* à qual cada seção está exposta, o tipo de rebentação e a energia das ondas, divergência ou convergência do fluxo junto à margem, entre outras.

Em relação à deposição de solo no talude superior ( $A_{d\ ts}$ ), esta foi verificada apenas na seção S142 (0,009 m<sup>2</sup>) na porção próxima da crista. No entanto, a magnitude da deposição foi pouco expressiva nesta seção, sendo 34 vezes menor que a erosão.

Conforme representado no Anexo A, os taludes superiores das seções apresentaram perdas de solo em diferentes comprimentos de talude ( $C_{ts}$ ). Ao relacionar a área de solo erodido ( $A_{e\ ts}$ ) ao longo de um determinado comprimento de talude superior ( $C_{ts}$ ) para cada seção, verificou-se um recuo médio do talude ( $R_{m\ ts}$ ) variando de 8,0 cm a 15 cm ao longo deste mesmo comprimento de talude após 11 meses de monitoramento. O mesmo cálculo de recuo da margem, quando tomado em relação ao período anual, retornou taxas de recuos médios do talude superior ( $i_{r\ ts}$ ) na porção erodida da ordem de 8,7 cm/ano a 16,4 cm/ano. Como o nível do reservatório permanece poucos dias do ano em sua cota máxima, ou próximo disso, estes valores de recuos da margem são ainda mais expressivos quando considerado este aspecto.

Em estudo publicado por Fernandez e Fulfaro (2000), os autores observaram taxas de recuo de margem entre 0,62 m/ano a 4,80 m/ano e uma média de 2,19

m/ano em sete pontos diferentes monitorados durante 21 meses no reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE Itaipu) por meio do método de estacas.

Da mesma forma como verificado para os taludes superiores, os taludes inferiores das seções topográficas apresentaram perdas de solo por erosão lacustre, conforme pode ser observado na Tabela 4, Figura 56 e Anexo A.

Tabela 4 - Análise do processo erosivo verificado nos taludes inferiores das quatro seções topográficas consideradas.

Variáveis	Seções topográficas			
	S139	S140	S141	S142
Área erodida do talude ( $A_{e\ ti}$ ) (m <sup>2</sup> )	0,153	0,350	0,442	0,106
Área depositada do talude ( $A_{d\ ti}$ ) (m <sup>2</sup> )	0,140	0,009	0,188	0,065
Comprimento do talude ( $C_{ti}$ ) (m)	3,116	4,164	4,463	2,620
Recuo médio do talude ( $R_{m\ ti}$ ) (cm)	0,433	8,197	5,705	1,550
Intervalo de tempo (anos)	0,917	0,917	0,917	0,917
Taxa de recuo do talude ( $i_{e\ ti}$ ) (cm/ano)	0,473	8,942	6,224	1,691

Fonte: O autor.

As maiores perdas de solo ocorreram na faixa do talude próxima da cota máxima do reservatório. A maior área de solo erodida do perfil ( $A_{e\ ti}$ ) foi registrada para a seção S141 (0,442 m<sup>2</sup>), seguido da S140 (0,350 m<sup>2</sup>) e S139 (0,153 m<sup>2</sup>). Em ambas as seções topográficas, a presença reduzida de blocos de rocha (Figura 55) pode ter contribuído, em partes, para maiores perdas de solo quando comparado com a seção S142 (0,106 m<sup>2</sup>) que se encontra melhor revestida superficialmente por blocos de rocha. Além disso, mesmo as seções S141 (19°), S140 (24°) e S139 (22°) apresentarem taludes inferiores com inclinações médias menores quando comparado à seção S142 (30°), mesmo assim estas apresentaram as maiores perdas de solo, o que condiz a discussão anterior. Para este caso específico a inclinação média do talude inferior apresentou relação inversa à perda de solo.

A deposição de solo ( $A_{d\ ti}$ ) foi verificada em todas as seções topográficas analisadas. O solo depositado consiste em uma fração do material erodido nas porções superiores do perfil topográfico. A maior deposição foi verificada para a seção S141 (0,188 m<sup>2</sup>) seguida da seção S139 (0,140 m<sup>2</sup>), as quais apresentam as

menores inclinações de talude inferior ( $19^\circ$  e  $22^\circ$ , respectivamente). Por outro lado, nas seções S142 ( $0,065 \text{ m}^2$ ) e S140 ( $0,009 \text{ m}^2$ ) ocorreu pouca deposição de solo. Estas seções apresentaram ângulos de inclinação médios maiores ( $30^\circ$  e  $24^\circ$ , respectivamente) em comparação às seções anteriores. Neste caso também foi verificada certa tendência de relação inversamente proporcional entre deposição de solo e inclinação do talude inferior, como observado para o talude superior.

Assim como para o talude superior, a diferença matemática entre o solo erodido e depositado no talude inferior resulta na quantidade de solo removido e transportado para dentro do reservatório. Essa quantidade, ao ser dividido pelo comprimento do trecho do talude inferior sobre o qual a erosão ocorreu, retorna o recuo médio do talude ( $R_{m\text{ti}}$ ), ou seja, a espessura da camada de solo removida. Para o caso específico, as seções S140 (8,197 cm) e S141 (5,705 cm) apresentaram os maiores recuos médios dentre todas as seções analisadas. Esse recuo por ser explicado pela combinação dos fatores de erosão e deposição de solo verificada ao longo do talude inferior (Tabela 4). O mesmo raciocínio pode ser aplicado à seção S139, a qual registrou o menor recuo médio (0,433 cm), ou seja, a pequena diferença entre a erosão e a deposição condicionou esta constatação.

Em relação ao período anual, a maior taxa de recuo médio do talude inferior foi verificada para a seção S140 (8,942 cm/ano), seguido de S141 (6,224 cm/ano), S142 (1,691 cm/ano) e S139 (0,473 cm/ano). Os valores mostram comportamentos variados entre diferentes seções, de maneira que a remoção de solo é consideravelmente maior nas seções S140 e S141 em comparação às seções S142 e S139.

Concluída a análise da erosão verificada no talude superior e inferior, pode-se agora realizar uma análise do quantitativo de solo perdido ao longo da seção topográfica como um todo. Este tópico da análise talvez seja o de maior interesse, uma vez que visa a mensuração do volume efetivo de solo erodido da margem e transportado para dentro do reservatório.

Desta forma, a análise do volume de solo erodido por seção topográfica será realizada assumindo primeiramente um comprimento longitudinal unitário de margem. Assim sendo, a área transversal (erosão e deposição) medida entre as linhas das campanhas sucessivas (azul e vermelha) na seção topográfica, quando considerada em relação ao comprimento unitário de margem, retorna o volume de solo erodido na seção topográfica.

A Tabela 5 apresenta os volumes, taxas e pesos de solo erodido por metro linear de margem, ou seção topográfica.

O volume de solo erodido ( $V_{e_s}$ ) na seção topográfica consiste na diferença matemática entre o volume erodido ( $m^3$ ) (ou área erodida ( $m^2$ ) x 1 m (comprimento longitudinal unitário)) e o volume depositado. Para a análise em questão, a maior perda volumétrica de solo para o período de 11 meses foi verificada para a seção S141 (0,526  $m^3$ ), seguido da seção S140 (0,441  $m^3$ ), S142 (0,336  $m^3$ ) e S139 (0,111  $m^3$ ). Ao considerarmos o período de um ano, a taxa de erosão ( $i_{v_s}$ ) atingida para as mesmas seções é de 0,574  $m^3$ /ano, 0,481  $m^3$ /ano, 0,367  $m^3$ /ano e 0,121  $m^3$ /ano, respectivamente.

Tabela 5 - Análise do processo erosivo verificado por comprimento unitário de margem para as quatro seções topográficas consideradas.

Variáveis	Seções topográficas			
	S139	S140	S141	S142
Volume erodido na seção ( $V_{e_s}$ ) ( $m^3$ )	0,111	0,441	0,526	0,336
Taxa de volume erodido na seção ( $i_{v_s}$ ) ( $m^3$ /ano)	0,121	0,481	0,574	0,367
Peso erodido na seção ( $P_{e_s}$ ) (ton)	0,167	0,661	0,789	0,504
Taxa peso erodido na seção ( $i_{p_s}$ ) (ton/ano)	0,182	0,721	0,860	0,550

Fonte: O autor.

A multiplicação do volume de solo erodido na seção pela densidade média aproximada de 1,5 ton/ $m^3$  dos taludes (CNEC, 1988b) permite o cálculo do peso ( $P_{e_s}$ ) de solo erodido. Considerando os 11 meses monitorados, a seção S141 apresentou o maior peso de solo erodido (0,789 ton), seguido de S140 (0,661 ton), S142 (0,504 ton) e S139 (0,167 ton). Ao considerar o peso de solo erodido em um ano, a taxa de erosão (ton/ano) verificada por metro linear de margem para as mesmas seções foi de 0,860 ton/ano, 0,721 ton/ano, 0,550 ton/ano e 0,182 ton/ano, respectivamente.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5 e considerando a representatividade de cada seção topográfica (item 3.2.1.2) do subtrecho monitorado, pode-se estimar o volume de solo erodido em cada subtrecho. Com base neste princípio foram estimados os valores apresentados na Tabela 6.

Desta forma, a estimativa total de perda de solo ( $V_{et}$ ) verificada ao longo de 205 m de margem (Figura 54) durante 11 meses de monitoramento foi de 70,4 m<sup>3</sup>. Com base neste volume, a taxa anual de perda de solo ( $i_{vt}$ ) estimada para os 205 m de margem foi de 76,9 m<sup>3</sup>/ano. Este volume de solo equivale ao volume aproximado transportado por 10 caminhões com capacidade de carga de 8 m<sup>3</sup> cada.

Assim como realizado para o comprimento unitário de margem, ao multiplicar o volume de solo erodido ( $V_{et}$ ) pela uma densidade média de 1,5 ton/m<sup>3</sup>, obteve-se uma estimativa de peso de solo erodido ( $P_{et}$ ) de 105,7 ton ao longo dos 205 m durante um período de 11 meses. Ao relacionar este volume a um período anual completo, a taxa anual de perda de solo ( $i_{pt}$ ) estimada foi de 115,3 ton/ano.

Tabela 6 – Estimativa de perda de solo verificada por subtrecho monitorado por cada seção topográfica.

Variáveis	Seções topográficas			
	S139	S140	S141	S142
Comprimento do subtrecho ( $C_m$ ) (m)	35	45	25	100
Volume erodido no subtrecho ( $V_{et}$ ) (m <sup>3</sup> )	3,889	19,823	13,145	33,600
Taxa erosiva no subtrecho ( $i_{vt}$ ) (m <sup>3</sup> /ano)	4,242	21,625	14,340	36,655
Peso erodido no subtrecho ( $P_{et}$ ) (ton)	5,833	29,734	19,718	50,400
Taxa peso erodido no subtrecho ( $i_{pt}$ ) (ton/ano)	6,363	32,437	21,510	54,982

Fonte: O autor.

Cabe salientar que o volume (ou peso) de solo erodido ao longo dos 205 m de margem ocorreu em uma pequena porção do talude superior e do talude inferior (Figura 56 e Anexo A). A altura média do talude superior submetida à erosão foi de 1,90 m (Tabela 3). Para o talude inferior a faixa média erodida foi de apenas 3,6 m (Tabela 4 e Anexo A).

O volume estimado de solo erodido é ainda mais significativo ao considerar que o nível do reservatório permaneceu apenas poucos dias durante os últimos 11 meses em sua cota máxima ou próximo disso. Esta constatação reforça ainda mais a capacidade de oscilação do nível do reservatório em remover solo ao longo das margens pelo solapamento gerado pelas ondas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ocorrência de processos erosivos em margens de reservatórios de água é um problema recorrente e de difícil controle. Os impactos gerados por este tipo peculiar de erosão podem englobar, isolado ou concomitantemente, aspectos de cunho técnico, ambiental, econômico e social. Os principais impactos gerados são assoreamento e diminuição da vida útil do reservatório, aumento da turbidez e diminuição da qualidade da água, tombamento de vegetação ciliar devido ao solapamento dos taludes, danos ou riscos a obras de infraestrutura ou construções limítrofes, perda de áreas destinadas a uso econômico ou recreativo, dentre outros.

Diante disso e da demanda de estudo de erosões em um reservatório de uma usina hidrelétrica no sul do Brasil, propôs-se uma metodologia de monitoramento de processos erosivos, levando em consideração as características e particularidades de grandes reservatórios de água.

A metodologia proposta foi dividida em três etapas, nomeadamente planejamento inicial, monitoramento topográfico e análise de dados. A execução prática das atividades e tarefas previstas em cada uma das etapas mostrou-se eficiente e atendeu a todos os requisitos básicos definidos previamente na fase de concepção da metodologia.

Cabe destacar que as atividades práticas de visita técnica de reconhecimento e planejamento de escritório previstas na primeira etapa da metodologia foram fundamentais e necessárias para o adequado planejamento e execução das atividades subsequentes previstas na segunda etapa do monitoramento. Desta forma, a orientação é de que o reconhecimento prévio do ambiente a ser alvo de monitoramento deve sempre ser realizado antes das atividades de monitoramento propriamente dito.

Quanto à aplicação prática da segunda etapa da metodologia, a execução do planejamento logístico em escritório, conforme descrito na metodologia, atendeu plenamente às necessidades da atividade subsequente de instalação de seções topográficas a campo. Da mesma forma, os equipamentos e materiais, bem como a equipe de trabalho empregada permitiram que a instalação e a coleta de dados referentes às seções topográficas a campo fossem realizadas de forma rápida e eficaz.

A terceira e última etapa da metodologia demonstrou que o processamento em *software* específico dos dados topográficos coletados a campo se mostrou muito viável do ponto de vista de rendimento. Esta constatação é extremamente importante, pois a facilidade e agilidade no processamento dos dados devem ser premissas básicas ao monitoramento deste tipo de ambiente, tendo em vista o grande volume de pontos que necessitam ser coletados a campo. Em relação à atividade de análise das seções topográficas após o processamento dos dados, a análise permitiu o acompanhamento e a mensuração dos processos erosivos vigentes.

As equações matemáticas propostas na metodologia mostraram-se adequadas ao tipo de análise pretendida e possibilitam quantificar a gravidade da erosão nos locais avaliados. As variáveis de entrada das equações podem ser obtidas com facilidade e rapidez em ambiente de trabalho de *software* de desenho assistido por computador (*AutoCAD*<sup>®</sup>). A agilidade na obtenção de informações é essencial tendo em vista o número de seções topográficas e o volume de dados que podem extraídos por meio deste tipo de análise.

Os perfis topográficos resultantes da primeira e segunda campanha de monitoramento utilizados na validação da metodologia permitiram reproduzir a conformação original e atual dos taludes, considerando um intervalo de 11 meses. Os perfis obtidos permitiram visualizar as zonas do talude mais afetadas pela erosão lacustre, bem como quantificar o volume de solo erodido em cada uma delas e no perfil como um todo.

Outra constatação importante é que o mapeamento das zonas mais afetadas do talude através de seções topográficas fornece informações importantes para a escolha, dimensionamento e execução de técnicas construtivas potenciais para o controle dos processos erosivos atuantes. Além disso, esta abordagem também contribui para a tomada de decisão técnica, e não empírica, dos trechos de margem prioritários de intervenção.

As perdas de solo verificadas nos quatro taludes avaliados foram obtidas considerando um intervalo de aproximadamente um ano entre medições sucessivas. Este intervalo de tempo mostrou-se adequado para que a erosão entre perfis topográficos sucessivos fosse perceptível. Além disso, também mostrou-se adequado com o regime de operação do nível da água do reservatório em questão. No entanto, estas constatações podem não ser aplicáveis a reservatórios localizados

em outras regiões do país, devendo cada situação ser estudada e avaliada de forma isolada.

Quanto ao número de campanhas de monitoramento, a execução de apenas duas campanhas não é suficiente para avaliar a tendência de comportamento dos processos erosivos em cada local monitorado. Neste caso, recomenda-se que o monitoramento deste tipo de ambiente seja conduzido por um período de pelo menos cinco anos consecutivos. Este período de tempo também é comumente utilizado em pesquisas similares voltadas ao monitoramento de erosões em taludes fluviais.

Como indicações para estudos futuros, o monitoramento contínuo e prolongado proverá dados de perdas de solo que poderão ser modelados estatisticamente com variáveis que caracterizam os taludes (resistência mecânica do solo, inclinação dos taludes, etc), o reservatório (*fetch*, orientação da margem, etc), o vento (direção, velocidade, etc), dentre outras. A modelagem destes dados poderá fornecer subsídios para a escolha, locação e dimensionamento de técnicas construtivas para mitigação dos processos erosivos verificados.

A partir da verificação e modelagem das perdas de solo ao longo das margens de todo o reservatório deve-se procurar otimizar o número de pontos a serem alvos de monitoramento, de modo a reduzir os custos do monitoramento. Esta otimização deve considerar a representatividade e as características das margens e dos diferentes cenários observados no reservatório alvo de estudo.

Diante do exposto, o estudo aprofundado do ambiente lacustre é essencial para que os processos erosivos resultantes possam ser melhor compreendidos, previstos e mitigados. Além disso, esta abordagem deve contribuir para um maior entendimento da dinâmica hidráulica envolvida na perda de solo em margens de grandes reservatórios de água, o que até o presente momento ainda é incipiente e pouco estudado pelo meio acadêmico brasileiro.



## REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. R. L. **Sedimentary structures - their character and physical basis**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- ANA. **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília: Agência Nacional de Águas (Brasil), 2018.
- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2008.
- BAO, Y. et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir. **CATENA**, v. 169, p. 128–139, 2018.
- BARTLEY, R. et al. **Measuring rates of bank erosion and channel change in northern Australia: a case study from the Daintree River catchment**. Clayton South: CSIRO, 2006.
- BHOWMIK, N. G. Lake shore protection against wind-generated waves. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 14, n. 5, p. 1064–1079, 1978.
- BHOWMIK, N. G. et al. **Waves generated by recreational traffic on the Upper Mississippi River system**. Champaign, Illinois: Illinois State Water Survey, Department of Energy and Natural Resources, 1991.
- BORGES, C. Z. **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, 2004.
- BRADBURY, J. et al. Monitoring and management of streambank erosion and natural revegetation on the lower Gordon River, Tasmanian Wilderness World Heritage Area, Australia. **Environmental Management**, v. 19, n. 2, p. 259–272, 1995.
- BULL, L. J. Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, n. 12, p. 1109–1123, 1997.
- CASADO, A. P. B. et al. 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, 2002.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1980.
- CHU, Y. **Shoreline erosion control - Engineering considerations**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.
- CNEC. **Inserção regional das UHE's Itá e Machadinho - Segunda fase. Diagnóstico preliminar dos indicadores ambientais do meio físico-geologia -**

**Texto e mapas IR2-RT-RE1-CN-25.** Itá: Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores S. A., 1988a.

**CNEC. Diagnóstico geral da área - Descrição geral dos impactos ambientais - Medidas mitigadoras propostas.** Itá: Consórcio Nacional de Engenheiros Consultores S. A., 1988b.

COKELET, E. D. Breaking waves. *Nature*, v. 267, p. 769–774, 1977.

CONSÓRCIO ITÁ. **Plano diretor do reservatório da UHE Itá e seu entorno. Programa 22: Usos múltiplos do reservatório.** ECESA - Engenharia Sócio-Ambiental S/C Ltda, , 2001.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. **Use of vegetation in civil engineering.** London: CIRIA, 2007.

CORREA, G. T.; FILHO, E. E. DE S. Avaliação dos processos de erosão marginal no Arquipélago Floresta Japonesa (Alto Rio Paraná). *Geografia (Londrina)*, v. 18, n. 2, p. 1–20, 2009.

COUPER, P.; STOTT, T.; MADDOCK, I. 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, 2002.

CURRAN, J. H. **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, 2001.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água.** 3. ed. Santa Maria: Edição dos autores, 2014.

ELETROBRAS. **Potencial hidrelétrico brasileiro - Aproveitamento acima de 50 MW,** 2017.

ELLIOTT, M. C. **Erosion of fractured banks, Lake Sakakawea, Western North Dakota.** Dissertação de mestrado—Grand Forks, North Dakota: University of North Dakota, 1991.

FERNANDES, J.; FREITAS, A. **Introdução à Engenharia Natural.** Portugal: EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres S. A., 2011.

FERNANDEZ, O. V. Q. O método dos pinos na quantificação da erosão marginal em rios e reservatórios. *Sociedade & Natureza*, v. 1, n. 15, p. 160–163, 1996.

FERNANDEZ, O. V. Q.; FULFARO, V. J. Magnitudes e processos da erosão marginal no rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. *Geografia*, v. 18, n. 1, p. 97–114, 1993.

FERNANDEZ, O. V. Q.; FULFARO, V. J. **Rates and processes of bank erosion, Itaipu reservoir, Paraguay-Brazil border, South America.** . In: 5°

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL, GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Belo Horizonte: 2000.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. 2. ed. Curitiba: Editora da UFPR, 2009.

FORMIGA, K. T. M.; VASCO, J. R. G.; PEREIRA, T. S. R. Monitoramento e modelagem de ondas em reservatório. In: **SALES, M. M. et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3p. 584.

FOX, W. T.; DAVIS, R. A. Simulation Model for Storm Cycles and Beach Erosion on Lake Michigan. **GSA Bulletin**, v. 84, n. 5, p. 1769–1790, 1973.

GATTO, L. W. **Techniques for Measuring Reservoir Bank Erosion**. Hanover, New Hampshire: US Army Corps of Engineers, 1988.

GERSCOWICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOLDEN, J. **Taking an ecological approach to reservoir shoreline erosion**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

GOLDSMITH, W. **Bioengineering for shoreline erosion control in Germany**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

GOOD, G. **The costs associated with shoreline erosion on Illinois lakes and reservoirs**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1983.

GUY, P. R. River bank erosion in the mid-Zambezi valley, downstream of Lake Kariba. **Biological Conservation**, v. 19, n. 3, p. 199–212, 1981.

HACKER, E.; JOHANNSEN, R. **Ingenieurbiologie**. Stuttgart: Eugen Ulmer KG, 2012.

HAIGH, M. **The use of erosion pins in the study of slope evolution**. Chicago, Illinois: Department of geography, University of Chicago, 1977.

HAKANSON, L. The influence of wind, fetch, and water depth on the distribution of sediments in Lake Vänern, Sweden. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 14, n. 3, p. 397–412, 1977.

HOOKE, J. M. An analysis of the processes of river bank erosion. **Journal of Hydrology**, v. 42, n. 1, p. 39–62, 1979.

HOOKE, J. M. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. **Earth Surface Processes**, v. 5, n. 2, p. 143–157, 1980.

HUDSON, H. R. A field technique to directly measure river bank erosion. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 19, n. 2, p. 381–383, 1982.

HUPP, C. R. et al. Bank erosion along the dam-regulated lower Roanoke River, North Carolina. In: **James, L.A., Rathburn, S.L., and Whittecar, G.R., eds., Management and Restoration of Fluvial Systems with Broad Historical Changes and Human Impacts**. USA: Geological Society of America Special Paper 451, 2009. p. 97–108.

INGLE, J. C. J. **The movement of beach sand - an analysis using fluorescent grains**. New York: Elsevier Publishing Company, 1966.

INMAN, D. L.; BOWEN, A. J. Flume experiments on sand transport by waves and currents. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 8, p. 137–150, 1962.

JUHLE, F. B.; ALLEN, H. H. **Corps of engineers' attempts to solve reservoir shoreline erosion problems using innovative approaches**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

JUSTINIANO, L. A. DE A.; SOUZA, C. A. DE; PIERANGELI, M. A. P. 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, 2013.

KANA, T. W. **Suspended sediment in breaking waves**. Columbia, South Carolina: University of South Carolina, 1979.

KFK. **Die Küste - Archiv für forschung und technik an der Nord- und Ostsee**. Hamburg: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, 2007.

LAWLER, D. M. A new technique for the automatic monitoring of erosion and deposition rates. **Water Resources Research**, v. 27, n. 8, p. 2125–2128, 1991.

LAWLER, D. M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, n. 9, p. 777–821, 1993a.

LAWLER, D. M. 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, 1993b.

LAWLER, D. M. et al. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. **Hydrological Processes**, v. 13, p. 977–992, 1999.

LAWLER, D. M.; LEEKS, G. J. L. **River bank erosion events on the Upper Severn detected by the Photo-Electronic Erosion Pin (PEEP) system**. Proceedings of the Oslo Symposium. **Anais...** In: HYDROLOGY FOR THE WATER MANAGEMENT OF LARGE RIVER BASINS. Oslo: 1992.

LAWSON, D. E. **Erosion of northern reservoirs shores - An analysis and application of pertinent literature**. Hanover, New Hampshire: United States Army Corps of Engineers - Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1985.

LEOPOLD, L. B.; EMMETT, W. W.; MYRICK, R. M. **Channel and hillslope processes in a semiarid area, New Mexico**: Professional Paper. Washington: United States Department of the Interior - Geological Survey, 1966.

LEWIN, J. Late-stage meander growth. **Nature Physical Science**, v. 240, n. 101, p. 116, 1972.

LIMA, M. C. et al. Sulcos, ravinas e voçorocas. In: **SALES, M. M. et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3p. 584.

LYONS, J. K.; HARRIS, D. W. **Impacts of shoreline erosion at bureau of reclamation facilities**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

MACFALL, J.; ROBINETTE, P.; WELCH, D. Factors Influencing Bank Geomorphology and Erosion of the Haw River, a High Order River in North Carolina, since European Settlement. **PLOS ONE**, v. 9, n. 10, p. 1–12, 2014.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 5. ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2014.

MAFFRA, C. R. B.; SUTILI, F. J. Metodologia para elaboração de projetos de Engenharia Natural em obras de infraestrutura. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 47/47, p. 73–94, 2017.

MASCARENHA, M. M. DOS A. et al. Ensaio aplicado ao estudo de erosões nas bordas e áreas do entorno de reservatórios. In: **SALES, M. M. et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3p. 584.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

NASCIMENTO, D. T. F. et al. 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, 2017. v. 3p. 584.

NILSSON, C. et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 405–408, 2005.

NRCS. **A guide for design and layout of vegetated wave protection for earthen embankments and shorelines**. Washington: United States Department of Agriculture, 2014.

PAIM, E. S.; ORTIZ, L. S. **Hidrelétricas na bacia do rio Uruguai: guia para ONGs e movimentos sociais**. Porto Alegre: Núcleo Amigos da Terra Brasil, 2006.

PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas: passo a passo**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

POPE, I. C.; ODHIAMBO, B. K. Soil erosion and sediment fluxes analysis: a watershed study of the Ni Reservoir, Spotsylvania County, VA, USA. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 3, p. 1719–1733, 2014.

PORTER, D. L. **Shoreline erosion impacts along Tennessee valley authority reservoirs**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

QUIGLEY, R. M.; GÉLINAS, P. J. Soil mechanics aspects of shoreline erosion. **Geoscience Canada**, v. 3, n. 3, p. 169–173, 1976.

REID, J. R. **Shoreline erosion processes: Orwell Lake, Minnesota**. Hanover, New Hampshire: United States Army Corps of Engineers - Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1984.

REID, J. R. **Mechanisms of shoreline erosion along lakes and reservoirs**. . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

ROCHA, H. J. DA; PASE, H. L. O conflito social e político nas hidrelétricas da bacia do Uruguai. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 30, n. 88, p. 99–113, 2015.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso de vidas à ascensão de lençol freático**. Tese (Doutorado - Programa de pós-graduação e área de concentração em Geotecnia)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.

ROMÃO, P. DE A.; SOUZA, N. M. DE. Aspectos geológicos e hidrogeológicos na deflagração e evolução da erosão hídrica em margens de reservatórios. In: **SALES, M. M.et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3p. 584.

RUBIO, M. F. **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, 2014.

SAINT-LAURENT, D. et al. Effects of simulated water level management on shore erosion rates. Case study: Baskatong Reservoir, Québec, Canada. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 28, n. 3, p. 482–495, 1 jun. 2001.

SALES, M. M. et al. Prevenção e controle de processos erosivos de borda de reservatório. In: **SALES, M. M.et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3.

SANDBERG, B. S. **Shoreline recession: past, present, and future, Lake Sakakawea, North Dakota**. Dissertação de mestrado—Grand Forks, North Dakota: University of Minnesota - Duluth, 1986.

SANTOS JUNIOR, O. F. DOS et al. Erosão continental, costeira e de bordas de reservatórios. In: **SALES, M. M.et al. Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. v. 3p. 584.

SCHENK, E. R. et al. **Bank Erosion, Mass Wasting, Water Clarity, Bathymetry and a Sediment Budget Along the Dam-Regulated Lower Roanoke River, North Carolina**. North Carolina: U. S. Geological Survey, 2010.

SCS. **A guide for design and layout of vegetative wave protection for earth dam embankments**. Washington: United States Department of Agriculture, 1974.

SCS. **Riprap for slope protection against wave action**. Washington: United States Department of Agriculture, 1983.

SICKLE, J. V. **GPS for land surveyors**. 4. ed. Boca Raton, Flórida: Taylor & Francis Group, LLC, 2015.

SILVA, A. et al. 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, 2007.

SILVA, R. S. et al. **Taxas de perda de solo por erosão e evolução progressiva de margem do arroio Pelotas**. . In: 21° CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E 4° MOSTRA CIENTÍFICA. Pelotas: 2012.

SIQUEIRA, A. G. et al. Monitoring Program of Reservoir Bank Erosion at Porto Primavera Dam, Parana River, SP/MS, Brazil. In: **LOLLINO, G. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3**. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2015. p. 351–355.

SOUSA, R. DOS S. et al. **Projeto básico e executivo - Proteção e revestimento vegetal das margens do reservatório da UHE Itá com técnicas de Engenharia Natural, trechos MD01 e ME05**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Laboratório de Engenharia natural (LabEN), 2018.

SOUZA, C. A. DE; CUNHA, S. B. 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, 2007.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SUTILI, F. J. et al. **Projeto básico e executivo - Proteção e revestimento vegetal das margens do reservatório da UHE Itá com técnicas de Engenharia Natural, trechos ME18 e MD09**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Laboratório de Engenharia natural (LabEN), 2017.

TANNER, W. F. Numerical estimates of ancient waves, water depth and fetch. **Sedimentology**, v. 16, n. 1–2, p. 71–88, 1971.

THORNE, C. R. **Field measurements of rates of bank erosion and bank material strength**. Proceedings of the Florence Symposium. **Anais...** In: EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENT. Florence: 1981.

THORNE, C. R. **Bank erosion and meander migration of the Red and Mississippi rivers, USA.** Proceedings of the Vienna Symposium. **Anais...** In: HYDROLOGY FOR THE WATER MANAGEMENT OF LARGE RIVER BASINS. Viena: 1991.

THORNE, C. R.; TOVEY, N. K. Stability of composite river banks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 6, n. 5, p. 469–484, 1981.

TOLMASQUIM, M. T. (ED.). **Geração de energia elétrica no Brasil.** 1. ed. Engenho Novo, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2005.

TOLMASQUIM, M. T. (ED.). **Energia renovável: Hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

TOMMASELLI, A. M. G. et al. **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: 2014.

USACE. **Part 1 - Hydrologic engineering concepts for reservoirs.** Washington: Department of the army - United States Army Corps of Engineers, 1997.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In: **SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (eds.) Landslides - Analysis and control.** Washington, D.C.: Special Report - Transportation Research Board, National Research Council, 1978. p. 234.

VIERO, A. C. **Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do taboão, RS.** Dissertação (Mestrado - Programa de pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

VOLKER, A.; HENRY, J. C. **Side effects of water resources management.** Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS - International Association of Hydrological Sciences, 1988.

WIEGEL, R. L. **Oceanographical engineering.** Mineola, New York: Dover publications, INC., 1992.

WOLMAN, M. G. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. **American Journal of Science**, v. 257, n. 3, p. 204–216, 1959.

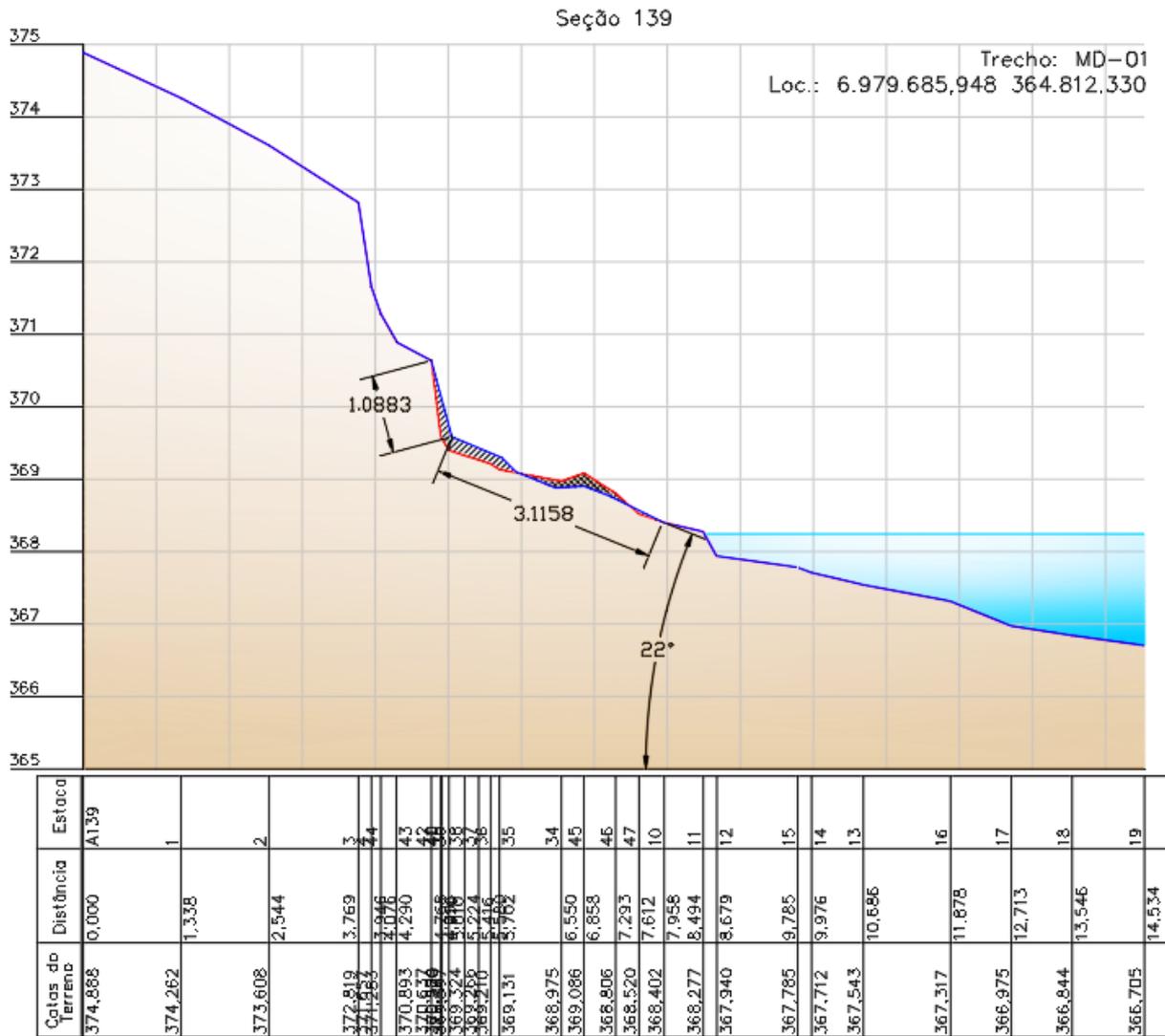
WOOD, A. M. M.; FLEMING, C. A. **Coastal hydraulics.** 2. ed. London - Basingstoke: The Macmillan Press Ltd, 1981.

ZABAWA, C. F.; RATCLIFFE, S.; HOCHHEIMER, J. N. **Shoreline and streambank erosion as a contributor of NPS pollution - An EPA perspective.** . In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION: A NATIONAL PROBLEM. McAlester: U.S. Army Corps of Engineers, 1992.

## ANEXOS

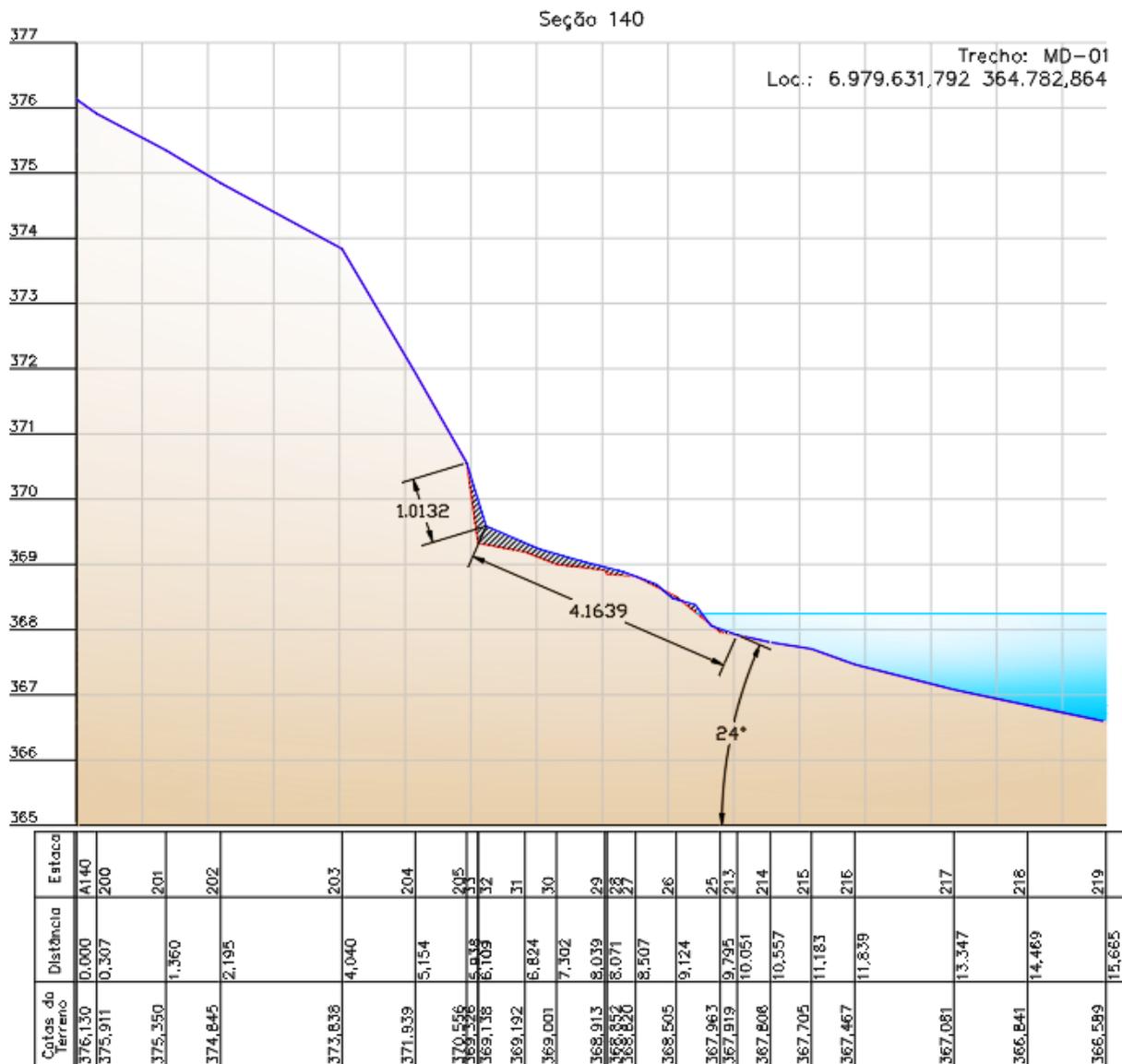
### ANEXO A – Perfis topográficos resultantes de duas campanhas sucessivas de monitoramento

Figura 57 – Perfis topográficos da seção topográfica S139 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento.



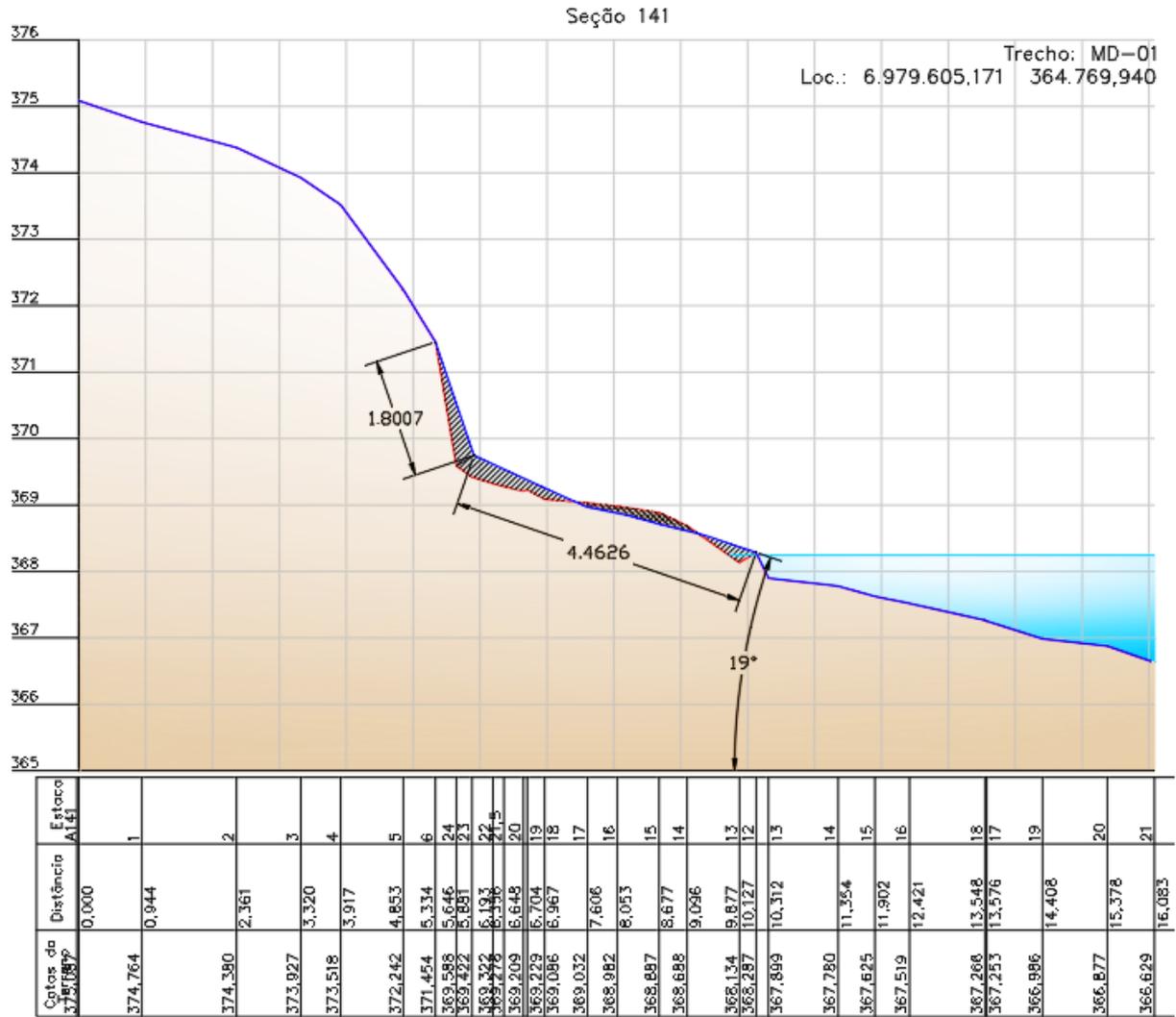
Fonte: Adaptado de REAL TOPOGRAFIA LTDA (2018).

Figura 58 - Perfis topográficos da seção topográfica S140 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento.



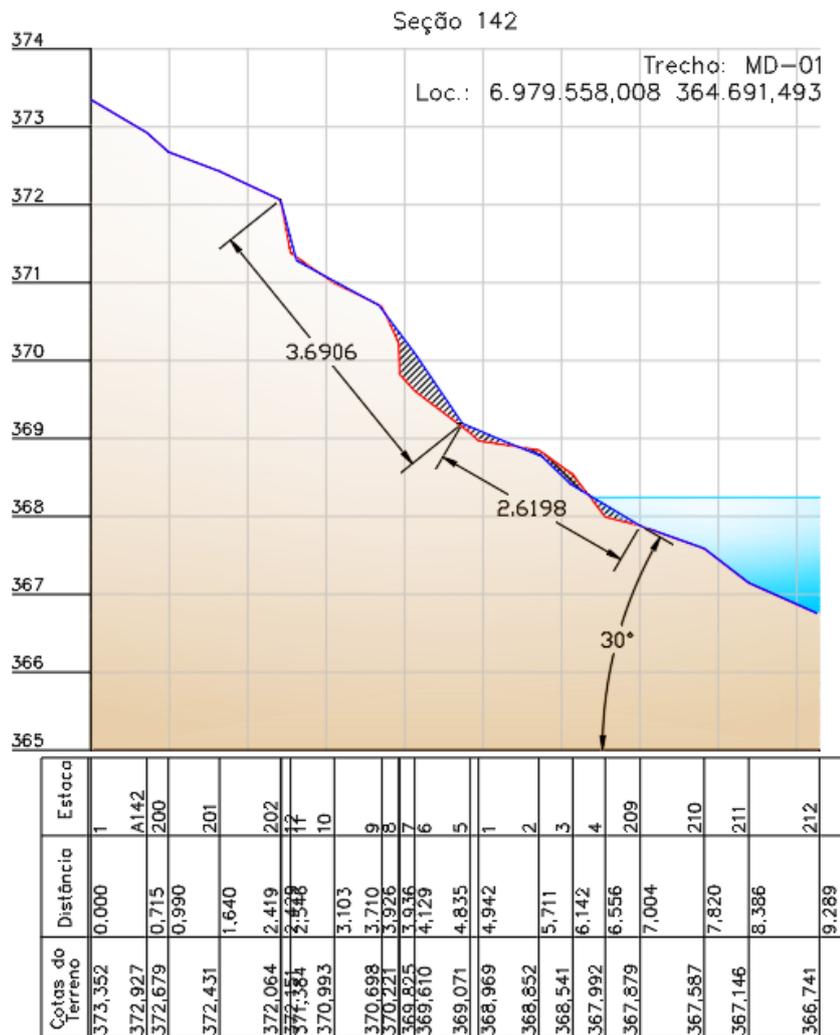
Fonte: Adaptado de REAL TOPOGRAFIA LTDA (2018).

Figura 59 - Perfis topográficos da seção topográfica S141 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento.



Fonte: Adaptado de REAL TOPOGRAFIA LTDA (2018).

Figura 60 - Perfis topográficos da seção topográfica S142 obtidos após a primeira (linha azul) e segunda (linha vermelha) campanha de monitoramento.



Fonte: Adaptado de REAL TOPOGRAFIA LTDA (2018).

## APÊNDICES

### **APÊNDICE A – Ficha técnica descritiva de trechos com erosão**

A ficha técnica apresentada abaixo pode ser utilizada pelos responsáveis técnicos para a coleta de informações pertinentes a cada trecho com erosão. A inclusão ou exclusão de variáveis pode ser realizada a critério do avaliador ou conforme necessidade observada a campo.

## Ficha Técnica Descritiva de Trechos com Erosão em Margens de Reservatórios

Trecho: Coordenadas (início e fim):

Comprimento (m): Data: Usina:

Cota do reservatório (m): Responsável:

### Aspectos ambientais e técnicos

1. Movimentos de massa:  Pequeno  Médio  Grande Obs.: \_\_\_\_\_  
 Profundidade: ( $< 1$  m) ( $\geq 1$  m e  $\leq 3$  m) ( $> 3$  m)
2. Cobertura superficial / talude inferior (%): Tipo: \_\_\_\_\_
3. Cobertura superficial / talude superior (%): Tipo: \_\_\_\_\_
4. Cobertura superficial / terreno natural (%): Tipo: \_\_\_\_\_
5. Árvores instáveis:  Sim  Não Quantas: \_\_\_\_\_
6. Inclinação do talude inferior (°):
7. Inclinação do talude superior (°):
8. Altura do talude superior (m):
9. Circulação de gado:  Não  Sim
10. Solo (talude inferior):  Argiloso  Siltoso  Arenoso  Saprólito  Rocha
11. Estratificação (tal. inferior):  Homogêneo  Duas camadas  Multicamadas
12. Solo (tal. superior):  Argiloso  Siltoso  Arenoso  Saprólito  Rocha
13. Estratificação (tal. superior):  Homogêneo  Duas camadas  Multicamadas
14. Erosão:  Voçoroca  Sulco  Ravina  Laminar Outros: \_\_\_\_\_

### Aspectos sociais

1. Impacto visual em áreas públicas:  Sim  Não
2. Perda de área de uso recreativo e econômico:  Sim  Não Tipo: \_\_\_\_\_
3. Risco à edificações e infraestrutura:  Sim  Não Tipo: \_\_\_\_\_
4. Conflitos estabelecidos:  Sim  Não Tipo: \_\_\_\_\_

Perfil topográfico característico:

Observações adicionais:

--	--

## APÊNDICE B – Localização de seção e pontos topográficos

A ficha técnica apresentada abaixo pode ser utilizada como modelo para exportação dos dados de localização dos pontos topográficos coletados sobre a seção topográfica. Esta planilha (formato .xls) deve ser preenchida para cada seção topográfica e campanha de monitoramento.

Tabela 7 – Modelo de planilha para exportação dos dados relativos aos pontos topográficos coletados sobre cada seção topográfica.

### LOCALIZAÇÃO DE SEÇÃO E PONTOS TOPOGRÁFICOS

#### Seção topográfica

Trecho:  
Seção:  
Localização:  
Azimute (ponto 1):

#### Levantamento

Data:  
Horário:  
Usina:  
Responsável:

Ponto	Descrição	Distância acumulada (m)	Latitude (m)	Longitude (m)	Cota (m)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
...					

Fonte: O autor.

### APÊNDICE C – Trechos de margem identificados com processos erosivos no reservatório da UHE Itá

Tabela 8 – Coordenadas UTM (SIRGAS 2000; Fuso 22) dos pontos de início (jusante) e final (montante) de cada trecho cadastrado com erosão (MD: margem direita; ME: margem esquerda), bem como o comprimento de margem (m) e o número de seções topográficas instaladas em cada trecho.

(continua)

Trecho	Coordenadas UTM				Comprimento (m)	Nº de seções
	Jusante (E (m))	Jusante (S (m))	Montante (E (m))	Montante (S (m))		
MD - 01	364337.54	6979460.70	364872.54	6979734.70	681	13
MD - 02	369049.26	6979491.16	369246.18	6979405.12	233	1
MD - 03	369649.09	6979264.55	370282.22	6978959.21	730	3
MD - 04	370440.80	6978812.38	370945.14	6978588.18	593	5
MD - 05	371030.69	6978569.17	371475.28	6978305.71	529	1
MD - 06	370364.53	6982285.70	370393.03	6982486.66	221	2
MD - 07	374252.53	6980449.70	373905.53	6980152.70	622	3
MD - 08	374108.62	6979494.49	375499.64	6979637.19	1561	5
MD - 09	390628.47	6976195.78	390547.43	6975608.11	960	5
MD - 10	391692.45	6974907.73	392168.16	6975315.11	648	4
MD - 11	392684.35	6975593.81	392878.00	6975707.03	234	2
MD - 12	399380.52	6973676.65	399034.92	6973605.41	570	5
MD - 13	399184.36	6973054.04	399319.59	6972882.51	238	3
MD - 14	406961.68	6963219.44	406684.29	6963002.86	377	4
MD - 15	411327.57	6957655.10	413465.77	6956042.86	3618	19

(continuação)

Trecho	Coordenadas UTM				Comprimento (m)	Nº de seções
	Jusante (E (m))	Jusante (S (m))	Montante (E (m))	Montante (S (m))		
ME - 01	368445.51	6978980.66	368440.54	6978786.70	203	2
ME - 02	369552.15	6978207.25	369663.96	6978386.25	276	2
ME - 03	371348.19	6981756.48	371571.67	6982005.31	444	2
ME - 04	371369.30	6983843.12	371746.93	6984111.08	510	3
ME - 05	373815.39	6983678.61	374221.60	6983618.14	493	7
ME - 06	374497.32	6983629.80	374438.40	6983797.69	221	2
ME - 07	374651.27	6983869.12	375187.61	6983777.42	614	3
ME - 08	375280.97	6983913.05	375365.22	6984074.55	247	2
ME - 09	374022.45	6981398.49	373921.49	6981248.73	181	2
ME - 10	373404.11	6980588.21	373150.56	6980286.68	443	2
ME - 11	381418.41	6977506.79	381420.18	6977672.16	177	2
ME - 12	382165.74	6979564.07	382233.14	6980046.40	513	2
ME - 13	383327.11	6981995.65	383494.44	6982163.86	255	2
ME - 14	383622.52	6982287.70	383789.52	6982498.70	316	2
ME - 15	384658.77	6980963.22	384375.09	6980296.90	928	4
ME - 16	383894.51	6978784.58	384033.06	6978368.81	456	3
ME - 17	389937.10	6976600.42	389797.07	6975818.04	1022	5
ME - 18	393141.29	6974593.24	393061.64	6975133.31	1025	6
ME - 19	402654.67	6967379.83	402966.49	6967449.73	419	3

(conclusão)

Trecho	Coordenadas UTM				Comprimento (m)	N° de seções
	Jusante (E (m))	Jusante (S (m))	Montante (E (m))	Montante (S (m))		
ME - 20	407326.48	6965663.73	407490.41	6965394.50	317	2
AN - 1 (ME)	371905.00	6980647.00	371825.00	6981128.00	732	4
AN - 2 (ME)	381742.00	6978131.00	381690.00	6978428.00	469	2
AN - 3 (ME)	393105.08	6975203.25	394128.16	6975398.60	1151	5
AN - 4 (MD)	411094.00	6958535.00	411188.00	6957926.00	639	6
<b>TOTAL</b>	<b>39 trechos</b>				<b>23866</b>	<b>150</b>

Fonte: O autor.