

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

**Junior Joel Dewes**

**MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS EM  
MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Santa Maria, RS  
2023



**Junior Joel Dewes**

**MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS  
EM MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili

Santa Maria, RS  
2023

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Dewes, Junior Joel

Modelagem e controle de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas / Junior Joel Dewes.- 2023.

178 p.; 30 cm

Orientador: Fabrício Jaques Sutili

Coorientador: Frederico Dimas Fleig

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2023

1. Técnicas de Engenharia Natural 2. Recuperação de áreas degradadas 3. Erosão lacustre 4. Empreendimentos hidrelétricos 5. Manejo de bacias hidrográficas I. Sutili, Fabrício Jaques II. Fleig, Frederico Dimas III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, JUNIOR JOEL DEWES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Junior Joel Dewes**

**MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS EM  
MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado 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 a obtenção do título de **Doutor em Engenharia Florestal**.

**Aprovado em 28 de julho de 2023:**

---

**Fabício Jaques Sutili, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)**

---

**Luiz Augusto Magalhães Endres, Dr. (UFRGS)**  
(por vídeoconferência)

---

**Daniel Iozzi Sperandelli, Dr. (AES Brasil)**  
(por vídeoconferência)

---

**Stephan Hörbinger, Dr. (BOKU)**  
(por vídeoconferência)

Santa Maria, RS  
2023



*Ao meu irmão Juliano Joel, à minha irmã Daila Carine,  
e especialmente à minha companheira Rita Sousa*





## AGRADECIMENTOS

*A escrita desta tese 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 desde o início da graduação. 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 desde os tempos de graduação;*

*- a Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Viena, Áustria, pela acolhida durante o período de doutorado sanduíche. Agradeço em especial aos orientadores no estrangeiro o Prof. Dr. Hans P. RAUCH e o Dr. Stephan Hörbinger pela troca de conhecimentos e experiências, as quais foram muito enriquecedoras, pessoal e profissionalmente;*

*- os meus colegas de laboratório, em especial a Rita S. SOUSA, o Daniel Z. PETERMANN e o Cristian J. R. PENA que estiveram diretamente envolvidos nas atividades desenvolvidas neste estudo. Agradeço também à Rita pela leitura e sugestões de melhora da parte escrita deste trabalho;*

*- a Real Geosoluções Ltda, em especial o Almir 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 toda equipe da Engie Brasil Energia, em especial ao Engenheiro Cid IONCECK que esteve envolvido diretamente no desenvolvimento e aplicação da metodologia de monitoramento apresentada neste trabalho, bem como no planejamento, implantação e seleção de soluções construtivas para o controle das erosões. Agradeço também pelo ótimo ambiente de trabalho e pelas conversas produtivas que tivemos;*

*- os membros da banca examinadora que gentilmente aceitaram a tarefa em analisar este documento e propor melhorias para a pesquisa;*

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

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

*- a Rita S. SOUSA, minha parceira de vida que sempre me apoiou, instruiu e incentivou no campo profissional e emocional para que este estudo se tornasse realidade. Agradeço o privilégio de poder estar ao seu lado todos os dias, com você a caminhada se torna muito mais tranquila e suave;*

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

*“Do rio que tudo arrasta se diz  
que é violento  
Mas ninguém diz violentas as  
margens que o comprimem”*

*(Bertolt Brecht)*



## RESUMO

### MODELAGEM E CONTROLE DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS

AUTOR: Junior Joel Dewes

ORIENTADOR: Fabrício Jaques Sutili

Os objetivos desta pesquisa foram investigar a relação entre as perdas de solo observadas nas margens do reservatório da UHE Itá e as características dos pontos monitorados, e investigar a capacidade de algumas técnicas de Engenharia Natural em mitigar os processos erosivos existentes. O objeto de estudo é o reservatório da UHE Itá localizado no rio Uruguai entre os estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS). O levantamento quantitativo de erosões foi realizado por meio de seções topográficas em 55 pontos de monitoramento distribuídos em todo o reservatório e considerou duas campanhas de monitoramento (01.2018 e 08.2021). Os quantitativos de erosões foram relacionados com variáveis fisionômicas e locais como *fetch*, geometria dos taludes, propriedades inerentes ao solo, oscilação da água, entre outros. As variáveis que se relacionaram direta ou indiretamente com o quantitativo de erosões foram altura e inclinação dos taludes; altura das ondas; inclinação do terreno natural; índices físicos dos solos; *fetch*, perímetro de margem e área. Para o controle de processos erosivos foram implantadas diversas técnicas de Engenharia Natural em diferentes arranjos construtivos em 4 trechos de intervenção (ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21) divididos em um total de 15 subtrechos. Algumas técnicas não apresentaram desempenho satisfatório para intervenções em margens de reservatório, especialmente as técnicas dependentes de propagação vegetativa das espécies utilizadas em obra. Desta forma, a implantação da componente vegetal em obra deve-se dar preferencialmente por meio de mudas produzidas em viveiro. As soluções construtivas para controle de erosões devem combinar, quase sempre, estruturas inertes com materiais construtivos vivos, de modo a resistir às solicitações impostas pela dinâmica lacustre no longo prazo. As obras em margens de reservatórios devem ser alvo de campanhas regulares de monitoramento e manutenção, intervindo sempre que necessário para correção de falhas técnicas e estruturais. Estas medidas devem priorizar especialmente o controle de formigas cortadeiras, o controle de espécies invasoras, o replantio de mudas, a realização de adubações de cobertura, o isolamento das áreas e ajustes executivos nas estruturas inertes. Espera-se que os avanços obtidos em relação à compreensão e controle de processos erosivos lacustres possam incentivar órgãos fiscalizadores e empreendedores no planejamento e implantação de medidas mitigadoras dos impactos ambientais inerentes à implantação e operação de grandes reservatórios de água.

**Palavras-chave:** Técnicas de Engenharia Natural. Recuperação de Áreas Degradadas. Erosão lacustre. Empreendimentos hidrelétricos. Manejo de Bacias Hidrográficas.



## ABSTRACT

### MODELLING AND CONTROL OF SHORELINE EROSIONS ON HYDROELECTRIC POWER PLANT RESERVOIRS

AUTHOR: Junior Joel Dewes  
ADVISOR: Fabrício Jaques Sutili

The objectives of this research were to investigate the relationship between the soil losses observed on the banks of the Itá Hydroelectric Power Plant reservoir and the characteristics of the monitored points, and to investigate the ability of Soil Bioengineering techniques to mitigate the existing erosive processes. The object of study is the Itá HPP reservoir located on the Uruguay River between the states of Santa Catarina (SC) and Rio Grande do Sul (RS). The quantitative survey of erosions was carried out through topographic sections in 55 monitoring points distributed along the reservoir and considered two monitoring campaigns (01.2018 and 08.2021). The quantitative erosions were related to physiognomic and local variables such as *fetch*, slope geometry, soil properties, water oscillation, among others. The variables that were directly or indirectly related to the quantity of erosions were height and slope elevation; waves height; slope of the natural terrain; physical soil indices; *fetch*, shoreline perimeter and area. To control erosion processes, several Soil Bioengineering techniques with different construction designs were implemented in 4 intervention sections (ME 05, MD 01, ME 03 and ME 21) divided into a total of 15 subsections. Some techniques did not perform satisfactory in reservoir banks, especially the techniques that depend on vegetative propagation. Therefore, the use of the plant component in the interventions should be preferably through seedlings produced in a nursery. Constructive solutions for erosion control must combine inert structures with live construction materials in order to resist the stress imposed by reservoir dynamics in the long term. Works on reservoir banks must be subject to regular monitoring and maintenance campaigns, with interventions whenever is necessary to correct technical and structural failures. These measures should prioritize the control of leaf-cutting ants, the control of invasive species, seedlings replanting, cover fertilizations, the isolation of areas and executive adjustments in inert structures. It is expected that the advances obtained in relation to the understanding and control of lake erosive processes can encourage inspection agencies and entrepreneurs in the planning and implementation of mitigation measures of the environmental impacts due to the implementation and operation of large water reservoirs.

**Keywords:** Soil Bioengineering techniques. Reclamation of Degraded Areas. Shoreline erosion. Hydro power plants. Watershed Management.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da mudança do nível do lençol freático devido ao enchimento de um reservatório de água.....	36
Figura 2 – Representação esquemática da Zona de Oscilação do Nível de Operação de Reservatórios (ZONOR) de usinas hidrelétricas. ....	37
Figura 3 – Características morfológicas dos três tipos de taludes comumente encontrados em reservatórios, elaborado com base em Bao et al. (2015a) e adaptado para o reservatório da UHE Itá. A – Taludes sem blocos de rocha; B – Taludes com blocos de rocha em diferentes densidades. C – Taludes rochosos. N. máx. – nível máximo normal; N. mín. – nível mínimo normal de operação.....	38
Figura 4 – Períodos hidrológicos do reservatório da Usina Hidrelétrica Itá (UHE Itá) para o ano de 2018. A figura foi elaborada considerando as nomenclaturas apresentadas por Bao et al., 2015b. ....	43
Figura 5 – Representação esquemática da erosão no talude vertical (sentido horizontal) e na plataforma em formação (sentido vertical) de uma margem em evolução geomorfológica.....	44
Figura 6 – Diferentes tipos de ondas a depender da inclinação da plataforma de abrasão. ....	48
Figura 7 – Convergência e divergência de ondas em função da topografia submersa das margens e direção predominante de propagação das ondas.....	49
Figura 8 – Taxas de erosão do solo verificados na ZONOR da Usina Hidrelétrica das Três Gargantas, China. A - Erosão do solo em função da inclinação do talude dentro da faixa de oscilação do reservatório considerando solo sem e com cobertura vegetal. B - Erosão do solo em função da cobertura superficial do solo considerando taludes com diferentes inclinações.....	52
Figura 9 - Distribuição das espécies vegetais com diferentes hábitos ao longo do talude e o desenvolvimento vegetativo sazonal comandado pela dinâmica de oscilação do nível da água. ....	59
Figura 10 – Oscilação do nível do reservatório da UHE Itá para o período entre janeiro de 2010 e junho de 2020. As zonas de umidade foram definidas a partir dos quartis (Q <sub>25%</sub> , Q <sub>50%</sub> , Q <sub>75%</sub> ) do conjunto de dados. ....	60
Figura 11 – Localização da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá) na região sul do Brasil. ....	63

Figura 12 – Perfil longitudinal do rio Uruguai e localização da UHE Itá.....	65
Figura 13 – Perímetro e conformação do reservatório da UHE Itá.....	66
Figura 14 – Nomenclatura de identificação dos segmentos morfológicos de margens de reservatórios.....	68
Figura 15 – Conformação geral e características representativas dos pontos de monitoramento em estudo no reservatório da UHE Itá.....	69
Figura 16 – A – Procedimento de instalação das seções topográficas a campo englobando o terreno natural, talude superior e talude inferior. As seções topográficas são instaladas perpendicularmente em relação às curvas de nível do terreno; e B – Dois perfis topográficos hipotéticos resultantes de campanhas consecutivas de monitoramento para obtenção de variáveis quantitativas. ....	70
Figura 17 – A – Direções do vento (graus) para oito direções diferentes; e B – Direções médias mensais do vento entre julho de 2018 e maio de 2020 (linhas cinzas) registradas na estação meteorológica Cetredia, Concórdia (SC) e média das direções mensais do vento (linha azul) adotada para a determinação do <i>fetch</i> em cada ponto monitorado. ....	76
Figura 18 – Exemplo de seção topográfica real com perfil original reconstituído e variáveis obtidas para análise dos processos erosivos acumulados. ....	78
Figura 19 – Trechos experimentais (ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21) para implantação de projetos piloto utilizando técnicas de Engenharia Natural no reservatório da UHE Itá. ....	80
Figura 20 – Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 05 e respectivos perfis executivos. ....	83
Figura 21 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho MD 01 e respectivos perfis executivos. ....	84
Figura 22 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 03 e respectivos perfis executivos. ....	85
Figura 23 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 21 e respectivos perfis executivos. ....	86
Figura 24 – Desenho esquemático do procedimento de instalação de pinos de erosão.....	88
Figura 25 – Gabarito utilizado para determinação da percentagem de cobertura superficial do solo proporcionado pelas espécies herbáceas. ....	90

Figura 26 – A – Gráfico com a classificação dos diferentes tipos de textura de solo existentes. B – Distribuição textural dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá.....	92
Figura 27 – Oscilação diária histórica do nível de operação do reservatório da UHE Itá entre janeiro de 2001 e agosto de 2021. Q <sub>00%</sub> : quartis.....	94
Figura 28 – A – Número de dias durante o período de janeiro de 2001 e agosto de 2021 e o tempo (%) equivalente em que o nível do reservatório permaneceu em cada intervalo de cotas (m). B - Número de dias durante o período de janeiro de 2001 e agosto de 2021 e o tempo (%) acumulado em que o nível do reservatório permaneceu acima de cada cota (m). .....	95
Figura 29 – Oscilação diária histórica do nível de operação do reservatório da UHE Itá entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. Q <sub>00%</sub> : quartis.....	96
Figura 30 – A – Número de dias durante o período de janeiro de 2018 e agosto de 2021 e o tempo (%) equivalente em que o nível do reservatório permaneceu em cada intervalo de cotas (m). B - Número de dias durante o período de janeiro de 2018 e agosto de 2021 e o tempo (%) acumulado em que o nível do reservatório permaneceu acima de cada cota (m). .....	97
Figura 31 – A – Erosão média acumulada (m <sup>2</sup> ) e taxa erosiva média (m <sup>2</sup> /ano) observada desde o início pleno de operação do reservatório (2001) até 2018 (início do monitoramento) e de 2018 até 2021 (final do monitoramento). B - Erosão média acumulada (m <sup>2</sup> ) e taxa erosiva média (m <sup>2</sup> /ano) observada entre janeiro de 2018 (início do monitoramento) e agosto de 2021 (final do monitoramento). .....	99
Figura 32 – Erosão média acumulada (m <sup>2</sup> ) e taxa erosiva média (m <sup>2</sup> /ano) em função do número médio de dias por ano em que o nível do reservatório permaneceu acima da cota 369,0 m de 2001 a 2018, de 2018 a 2020 e de 2020 a 2022. ....	100
Figura 33 – Número de dias em que o nível da água do reservatório da UHE Itá permaneceu nos diferentes intervalos de cota (m) e a erosão acumulada média (m <sup>2</sup> ) nas respectivas cotas para o período de 2001 a agosto de 2021. ....	101
Figura 34 – Inclinação média (°) dos taludes dentro do reservatório (talude superior e inferior) e dias de oscilação do nível da água em diferentes intervalos de cotas (m) considerando a série histórica de oscilação de janeiro de 2001 a agosto de 2021. ....	103
Figura 35 – A – Erosão acumulada (m <sup>2</sup> ) na seção acima da cota 369 m em função da erosão total acumulada na seção (m <sup>2</sup> ). B - Erosão acumulada (m <sup>2</sup> ) na seção no intervalo de cota entre 368 m e 369 m em função da erosão total acumulada na	

seção (m <sup>2</sup> ) e da altura total da seção (m). C - Erosão acumulada (m <sup>2</sup> ) na seção no intervalo de cota entre 367 e 368 m em função da erosão total acumulada na seção (m <sup>2</sup> ). .....	104
Figura 36 – A – Relação entre o comprimento da seção (L.) (m) e a relação altura total da seção (Alt.) (m) e inclinação da superfície reconstituída (Inclin.) (°). B - Relação entre o comprimento da seção (L.) (m) e a relação da área total erodida da seção (Área) (m <sup>2</sup> ) e inclinação da superfície reconstituída (Inclin.) (°). O comprimento da seção (L.) é tomado da crista do talude superior até a cota mínima (m) de reconstituição da seção, conforme representado na Figura 18. ....	105
Figura 37 – Mobilização de solo (cm/3,6 anos) no talude inferior em função da inclinação do talude inferior (°) abrangendo pontos de monitoramento em todo o reservatório e diferentes fisionomias de margens. O período de 3,6 anos corresponde ao intervalo entre a primeira (janeiro de 2018) e a quarta campanha de monitoramento (agosto de 2021). .....	108
Figura 38 – A – Fisionomia geral de seção de monitoramento com talude inferior suave e ausência de blocos de rocha. B – Fisionomia geral de seção de monitoramento com talude inferior íngreme e densamente recoberto por blocos de rocha. ....	109
Figura 39 – Relação entre comprimento (m) medido no terreno a partir da crista do talude superior até a cota com erosão significativa dentro do reservatório e a inclinação média (°) do talude inferior, considerando pontos de monitoramento com e sem blocos de rocha na superfície do talude inferior. ....	111
Figura 40 – A – Detalhe do sistema radicial de indivíduo arbóreo parcialmente exposto auxiliando na estruturação do solo o controle do recuo da margem. B – Detalhe de bloco de solo rompido e depositado na base do talude superior colonizado por gramíneas. ....	112
Figura 41 – Valores médios de área transversal (m <sup>2</sup> ) de solo erodido, depositado e exportado da seção topográfica para diferentes intervalos de cotas dos 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. ....	115
Figura 42 – Valores médios de espessura (cm) de solo erodido, depositado e exportado da seção topográfica para diferentes intervalos de cotas dos 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. ....	116
Figura 43 – Contribuição do talude inferior na quantidade parcial de: A - Solo erodido (m <sup>2</sup> ); B – Depositado (m <sup>2</sup> ); C – Exportado (m <sup>2</sup> ) e D – Espessura (cm) em relação ao	

total verificado na seção para os 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.....	118
Figura 44 – A – Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento (H./L.) (m/m) da seção topográfica e a inclinação média da seção (°). B - Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e o diâmetro máximo (DM) (m) e a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. C - Relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento da superfície da seção (m) e a relação altura/inclinação média da seção (m/°) nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados. ....	119
Figura 45 – A - Relação entre o comprimento e altura do talude superior (L./H. TS) com o diâmetro máximo (DM) (m) e a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. B - Relação entre o comprimento e altura do talude inferior (L./H. TI) combinado com o diâmetro máximo (DM) (m) e o comprimento e altura do talude superior (L./H. TS) combinado com a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. C – Relação entre a altura da seção (H. seç.) (m) combinado com peso específico aparente seco ( $Y_d$ ) (kN/m <sup>3</sup> ) e a altura do talude superior (H. TS) (m) combinado com o peso específico submerso dos solos ( $Y_{sub}$ ) (kN/m <sup>3</sup> ) nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados. ....	120
Figura 46 – Relação entre a inclinação média do terreno natural (TN) (°) e o peso específico submerso ( $Y_{sub}$ ) (kN/m <sup>3</sup> ); o peso específico aparente seco ( $Y_d$ ) (kN/m <sup>3</sup> ) e o índice de vazios ( $e$ ) dos solos nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados. ...	121
Figura 47 – A – Relação entre o diâmetro médio (m) e o comprimento (L.) (m) e altura (H.) (m) do talude inferior (TI) considerando diâmetro máximo (DM) (m) e amplitude diamétrica (AD) dos blocos de rocha. B – Relação entre a altura significativa de onda (Hs) (cm) e a altura (H.) (m) do talude superior (TS). C – Relação entre o fetch (m) e a quantidade de solo (Er. – Dep.) (m <sup>2</sup> ) exportada do talude superior (TS) e a altura (H.) (m) do talude superior (TS). D – Relação entre a relação comprimento (L.) (m) e altura (H.) (m) do talude superior (TS) e a deposição de solo (Dep.) (m <sup>2</sup> ) observada no talude inferior (TI). E – Relação entre a tangente da inclinação do talude superior (tg (Incl. TS)) (°) com a erosão (m <sup>2</sup> ) no talude inferior (TI) e a quantidade de solo (Er. – Dep.) (m <sup>2</sup> ) exportada do talude inferior (TI), considerando a amplitude diamétrica (AD) (m) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha. F - Relação entre a tangente da inclinação do talude superior (tg (Incl. TS)) (°) com a quantidade de solo mobilizada (Er. + Dep.) (m <sup>2</sup> ) no talude	

inferior (TI) e a espessura média de solo exportada (Er. - Dep. / L.) (m <sup>2</sup> ) no talude inferior (TI), considerando a amplitude diamétrica (AD) (m) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha. ....	123
Figura 48 – A – Deposição de solo no pé do talude superior oriundo da desestruturação do maciço exposto à ação da chuva e do vento. B – Detalhe do rachamento e desprendimento de solo em placas no talude superior devido a ciclos sucessivos de expansão e contração do maciço argiloso. ....	124
Figura 49 – A – Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento (H./L.) (m/m) da seção topográfica e a inclinação média da seção (°). B - Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento do talude inferior (H./L. TI) (m/m) e o comprimento do talude inferior (L. TI) (m). C - Relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento da superfície da seção (m) e a relação altura/inclinação média da seção (m/°) nos 28 pontos sem blocos de rocha monitorados. ....	126
Figura 50 – Relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a inclinação do terreno natural (TN) (°) e o comprimento do talude superior (L. TS) (m). B – Relação entre a inclinação do talude superior (TS) e a relação comprimento/altura do talude superior (L./H. TS) (m). C - Relação entre a altura da seção (H. seç.) (m) combinado com peso específico seco aparente seco ( $Y_d$ ) (kN/m <sup>3</sup> ) e a altura do talude superior (H. TS) (m) combinado com o peso específico submerso dos solos ( $Y_{sub}$ ) (kN/m <sup>3</sup> ). D - Relação entre a altura significativa de onda (Hs) (cm) e a altura do talude superior (H. TS) (m) e a inclinação do talude inferior (TI) (°). ....	128
Figura 51 – A – Relação entre a umidade natural do solo (w nat) (%) e a quantidade de solo exportada do talude superior (Er. – Dep. TS) (m <sup>2</sup> ). B – Relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TS) (m <sup>2</sup> ) e exportado (Er. - Dep. TS) (m <sup>2</sup> ) do talude superior. C – Relação entre a erosão no talude superior (Er. TS) (m <sup>2</sup> ) e a inclinação do terreno natural (TN) (°). D – Relação entre o fetch e perímetro na margem (m*m) e a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TI) (m <sup>2</sup> ) e erodido (Er. TI) (m <sup>2</sup> ) no talude inferior. O perímetro é um conceito elaborado pelo autor desta pesquisa e representa o perímetro de margem na margem oposta ao ponto em análise resultante da projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch, conforme método descrito em NRCS (2014). E – Relação entre a área e fetch com a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TI) (m <sup>2</sup> ) e erodido (Er. TI) (m <sup>2</sup> ) no talude inferior. A área é um conceito	

elaborado pelo autor desta pesquisa e representa a área superficial do espelho d'água abrangida pela projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch, conforme método descrito em NRCS (2014).....	131
Figura 52 – A - Representação esquemática de pontos de monitoramento expostos a fetchs e áreas grandes devido às grandes larguras do reservatório e margem oposta recortada. B - Pontos em monitoramento expostos a fetchs orientados no sentido diagonal do eixo do reservatório. ....	133
Figura 53 – Integridade física das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução.....	135
Figura 54 – A – Desenvolvimento vegetativo reduzido ou inexistente em intervenções baseadas em propagação vegetativa. B – Competição entre espécies gramíneas invasoras e espécies autóctones implantadas em linhas de plantio. C – Remoção de mudas e exposição de sistemas radiciais em cotas inferiores da técnica de plantio em quadrícula. D – Exposição da face do biorretentor devido à erosão de solo e aprofundamento do talude inferior pelo embate de ondas e oscilação do nível da água. ....	138
Figura 55 – Efeito técnico das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução. ....	140
Figura 56 – A – Manutenção de perfil de compensação entre linhas longitudinais sucessivas de intervenção. B – Deposição de restos orgânicos na margem após ciclo de elevação e depleção do nível de operação do reservatório. C – Estabilidade da superfície do solo para desenvolvimento e recobrimento superficial por espécies herbáceas autóctones previstas em projeto. D – Deposição de sedimentos oriundos do talude superior no tardo de linha de plantio adensado de mudas. ....	141
Figura 57 – A e B – Espessura média anual (cm) da camada de solo erodida (+) ou deposição (-) no talude superior (1\5) e talude inferior (2\6; 3\7; 4\8) nos diferentes subtrechos intervencionados com diferentes técnicas e arranjos construtivos. ....	142
Figura 58 – Desenvolvimento vegetativo das plantas nas intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e	

MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução. ....	145
Figura 59 – A e B – Diâmetro médio (mm). C e D – Altura média (m). E e F – Número médio de plantas por parcela das espécies vegetais arbustivas implantadas em cada subtrecho de intervenção. O eixo das abscissas corresponde aos meses de desenvolvimento vegetativo (0 a 33). As campanhas de monitoramento do desenvolvimento vegetativo ocorrem aos 0 meses, 10 meses e 33 meses. G – Perda anual média de plantas por parcela para as diferentes técnicas executadas nos subtrechos. ....	147
Figura 60 – Cobertura superficial do solo por espécies herbáceas ( <i>Arachis repens</i> e <i>Sphagneticola trilobata</i> ) no talude superior (TS) (A e C) e talude inferior (TI) (B e D) nos respectivos subtrechos intervencionados. As campanhas de monitoramento do desenvolvimento vegetativo ocorrem aos 0 meses, 10 meses e 33 meses. ....	154
Figura 61 – Soma da pontuação (integridade física, efeito técnico e desenvolvimento vegetativo) das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução. ....	156
Figura 62 – Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá. ....	157
Figura 63 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 2) do reservatório da UHE Itá. ....	158
Figura 64 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 3) do reservatório da UHE Itá. ....	158
Figura 65 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 4) do reservatório da UHE Itá. ....	159
Figura 66 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá. ....	159
Figura 67 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 7) do reservatório da UHE Itá. ....	160
Figura 68 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá. ....	160
Figura 69 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 2) do reservatório da UHE Itá. ....	161



Figura 70 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 3) do reservatório da UHE Itá.....	161
Figura 71 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 03 (subtrecho 5) do reservatório da UHE Itá.....	162
Figura 72 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 03 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá.....	162
Figura 73 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá.....	163
Figura 74 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 4) do reservatório da UHE Itá.....	163
Figura 75 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá.....	164
Figura 76 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 7) do reservatório da UHE Itá.....	164
Figura 77 – Categorias de pontuação e respectivas descrições para avaliação da eficácia das técnicas de Engenharia Natural implantadas no reservatório da UHE Itá. .....	177
Figura 78 – Planilha para pontuação do desempenho (integridade, efeito e desenvolvimento vegetativo) das técnicas construtivas executadas nos diversos subtrechos no reservatório da UHE Itá. ....	178



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição das técnicas de Engenharia Natural monitoradas por trecho e subtrecho.....	81
Tabela 2 – Índices físicos dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá. $w_{nat}$ : umidade natural (%); $\gamma_{nat}$ : peso específico aparente natural ( $kN/m^3$ ); $\gamma_d$ : peso específico aparente seco ( $kN/m^3$ ); $\gamma_s$ : peso específico dos sólidos ( $kN/m^3$ ); $\gamma_{sat}$ : peso específico aparente saturado ( $kN/m^3$ ); $\gamma_{sub}$ : peso específico submerso ( $kN/m^3$ ); $e$ : índice de vazios; $\eta$ : porosidade (%) e $S$ : grau de saturação (%)......	91
Tabela 3 – Granulometria (areia, silte e argila) e características químicas dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá. MO: matéria orgânica (%)......	92
Tabela 4 - Valores médios de recuos da crista (cm), erosão ( $m^2$ ), comprimento (m) e recuo médio (cm) do talude superior considerando diferentes tipos de usos do solo no terreno natural. TS: talude superior.....	112
Tabela 5 – Valores médios de erosão ( $m^2$ ), comprimento (m) e recuo (cm) da margem considerando o talude superior e inferior com ou sem blocos de rocha na superfície.....	114



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>31</b>
1.1 OBJETIVOS .....	33
1.1.1 Objetivos gerais .....	33
1.1.2 Objetivos específicos.....	33
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>35</b>
2.1 Operação de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos .....	35
2.2 A Zona de Oscilação do Nível de Operação do Reservatório (ZONOR) .....	36
2.3 Dinâmica lacustre na ZONOR .....	39
2.4 Fatores condicionantes das erosões na ZONOR .....	43
2.5 Modelagem de processos erosivos na ZONOR .....	52
2.6 Controle de processos erosivos na ZONOR .....	53
2.7 Engenharia Natural aplicada a reservatórios de água.....	56
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>63</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO .....	63
3.2 MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS.....	67
3.2.1 Oscilação do nível de operação do reservatório .....	67
3.2.2 Caracterização dos pontos de estudo .....	67
3.2.3 Obtenção de dados quantitativos de erosão .....	69
3.2.4 Padrões gerais das erosões para diferentes fisionomias .....	71
3.2.5 Análise detalhada das erosões para diferentes fisionomias.....	73
3.2.5.1 Caracterização física dos solos.....	73
3.2.5.2 Direção e velocidade do vento .....	75
3.2.5.3 Fetch .....	75
3.2.5.4 Variáveis quantitativas das seções topográficas .....	77

3.3 EFICÁCIA TÉCNICA DAS INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL.....	78
3.3.1 Caracterização dos trechos de intervenção.....	78
3.3.2 Monitoramento do desempenho das técnicas de intervenção .....	87
3.3.2.1 <i>Integridade estrutural das intervenções</i> .....	87
3.3.2.2 <i>Efeito técnico das intervenções</i> .....	88
3.3.2.3 <i>Desenvolvimento vegetativo das plantas</i> .....	89
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>91</b>
4.1 ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS .....	91
4.1.1 Caracterização dos pontos de monitoramento .....	91
4.1.2 Oscilação do nível de operação do reservatório.....	93
4.1.3 Erosão histórica acumulada nas margens .....	98
4.1.4 Método de determinação de erosões acumuladas nas margens.....	105
4.1.5 Fisionomias das margens e mobilização de solo.....	107
4.1.6 Faixa de terreno com processos erosivos significativos .....	110
4.1.7 Recuos e erosões médias no talude superior e inferior .....	111
4.1.8 Geometria, fisionomia e erosões em áreas com blocos de rocha .....	118
4.1.9 Geometria, fisionomia e erosões em áreas sem blocos de rocha .....	125
4.2 EFICÁCIA TÉCNICA DAS INTERVENÇÕES .....	134
4.2.1 Integridade da técnica.....	134
4.2.2 Efeito da técnica .....	139
4.2.3 Desenvolvimento vegetativo .....	145
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>165</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>169</b>
<b>APÊNDICE A – CATEGORIAS DE PONTUAÇÃO DA EFICÁCIA DAS INTERVENÇÕES .....</b>	<b>177</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A construção de barramentos causou alterações em cerca de 60% dos maiores sistemas fluviais do mundo (NILSSON et al., 2005). A execução de novos empreendimentos tem-se intensificado nos últimos anos em todo o mundo, com perspectiva de expansão para as próximas décadas (ICOLD, 2020; ROCHA; PASE, 2015; ZARFL et al., 2015).

As regiões que possuem o maior número de empreendimentos planejados e em construção concentram-se no Sudeste Asiático, na América do Sul e na África, sobretudo em países emergentes como a China, a Índia, o Paquistão, o Brasil e a República Democrática do Congo. Na América do Sul, especificamente no Brasil, as bacias Amazônica e do rio da Prata serão as que receberão o maior número de novos empreendimentos. Estima-se que em 2040 em torno de 39% do potencial hidrelétrico tecnicamente aproveitável do mundo esteja explorado, em contraste com os 22% atuais (ZARFL et al., 2015).

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) registra atualmente 10250 grandes<sup>1</sup> barragens destinadas ao aproveitamento hidrelétrico. Ao considerar os barramentos destinados a usos múltiplos, esse quantitativo chega a 58713 reservatórios em todo o mundo. Além disso, pelo menos 3700 novas barragens estão planejadas ou sendo construídas para fins hidrelétricos (ICOLD, 2020).

Atualmente, a América do Sul e Central suprem mais da metade (54%) da sua demanda energética a partir de hidreletricidade, sendo as regiões no mundo que mais produzem e consomem eletricidade oriunda desta fonte energética. No Brasil, 63,8% da eletricidade consumida em 2019 foi produzida por empreendimentos hidrelétricos (BP, 2020). O parque hidrelétrico brasileiro conta atualmente com 1349 empreendimentos em operação, considerando Usina Hidrelétricas (UHE's) (94%), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) (5,2%) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH's) (0,8%). Além disso, 32 novos empreendimentos estão em construção e 82 ainda não tiveram a sua execução iniciada, sendo 94% do total compreendido por PCH's (SIGA, 2023).

---

<sup>1</sup> Compreendem grandes barragens as que possuem altura igual ou maior que 15 m medidos entre a base da fundação e a crista ou que possuem altura entre 5 m e 15 m e com capacidade de acumulação do reservatório maior que 3 milhões de metros cúbicos (ICOLD, 2020).

Denota-se a partir do exposto a existência de um grande quantitativo de barramentos com grandes acumulações de água em todo mundo. O aumento da população mundial aliado à necessidade de manutenção da atividade econômica tem intensificado o desenvolvimento de novos projetos para construção de barramentos. Essa intensa exploração dos recursos hídricos gera grandes impactos sociais, ambientais e econômicos nas regiões afetadas por empreendimentos. Neste âmbito, é imprescindível que a exploração dos recursos hídricos seja realizada de forma racional e sustentável. Isto significa que os impactos inerentes à operação dos empreendimentos hidrelétricos sejam adequadamente mensurados, compreendidos e mitigados, de modo a minimizar os efeitos adversos oriundos da sua execução e operação.

A pesquisa aqui apresentada irá focar, inicialmente, na compreensão dos fenômenos envolvidos na deflagração de erosões na Zona de Oscilação do Nível de Operação do Reservatório (ZONOR). Segundo Su et al. (2017) e Kaczmarek et al. (2016), este tipo de abordagem em margens de reservatórios a nível mundial ainda é incipiente. Esta constatação reforça a necessidade urgente do desenvolvimento de pesquisas direcionadas aos fenômenos erosivos, contribuindo para uma gestão mais adequada dos empreendimentos existentes e planejados.

Em um segundo momento serão aplicadas técnicas de Engenharia Natural em trechos pilotos no reservatório e avaliadas as respectivas eficácias das soluções construtivas no controle destas erosões. A Engenharia Natural prioriza o uso de plantas, que podem ser combinadas com estruturas inertes, para a estabilização de taludes lacustres. Este tipo de abordagem apresenta menor impacto, é de fácil instalação e exige pouca manutenção em comparação às estruturas tradicionais (FERNANDES; FREITAS, 2011; SOUSA; DEWES; SUTILI, 2018, 2019). Além disso, o uso de plantas nas intervenções permitem inúmeros ganhos ecológicos, estéticos e paisagísticos (NRCS, 2014; SOUSA, 2015), aspectos fundamentais em projetos de recuperação de áreas degradadas e integração do local à paisagem.

Assim sendo, as hipóteses relacionadas ao estudo das erosões são:

H<sub>0</sub>: As perdas de solo verificadas nas margens do reservatório não apresentam relação com variáveis dos locais monitorados;

H<sub>1</sub>: As perdas de solo verificadas nas margens do reservatório apresentam relação com variáveis dos locais monitorados;

As hipóteses relacionadas ao controle de processos erosivos são:



H<sub>0</sub>: As técnicas de Engenharia Natural não são capazes de mitigar processos erosivos em margens de grandes reservatórios de água;

H<sub>1</sub>: As técnicas de Engenharia Natural são capazes de mitigar processos erosivos em margens de grandes reservatórios de água.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos gerais

- Investigar a relação entre as perdas de solo observadas nas margens do reservatório da UHE Itá e as características dos pontos monitorados;
- Investigar a capacidade de algumas técnicas de Engenharia Natural em mitigar os processos erosivos observados nas margens do reservatório da UHE Itá.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar campanhas de monitoramento quantitativo de erosões em diferentes pontos ao longo do reservatório;
- Quantificar, modelar e prever o comportamento dos processos erosivos nos pontos monitorados;
- Desenvolver método prático para determinação de erosões históricas acumuladas em qualquer ponto de margem e reservatório;
- Acompanhar a implantação de técnicas de Engenharia Natural em alguns trechos de margens;
- Avaliar a eficácia de diferentes técnicas na mitigação de processos erosivos nos locais intervencionados;
- Avaliar a dinâmica de desenvolvimento para especificação de espécies autóctones adaptadas à dinâmica lacustre.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Operação de reservatórios de empreendimentos hidrelétricos

A construção de barragens modificou 172 dos 292 maiores sistemas fluviais do mundo (NILSSON et al., 2005). No ano de 2000 estimava-se que dois terços (2/3) de toda água doce fluindo em direção aos oceanos estava obstruída por mais de 45000 grandes barragens (altura maior que 15 metros) e aproximadamente 800000 barragens menores (FUGGLE et al., 2000 apud NEW; XIE, 2008; NILSSON; BERGGREN, 2000). Estas barragens têm funcionalidades e usos múltiplos, como controle de enchentes, aumento da capacidade de navegação, irrigação, abastecimento de água, produção de energia elétrica e atividades recreativas (ALI, 2003; NEW; XIE, 2008; NILSSON; BERGGREN, 2000; YANG et al., 2012).

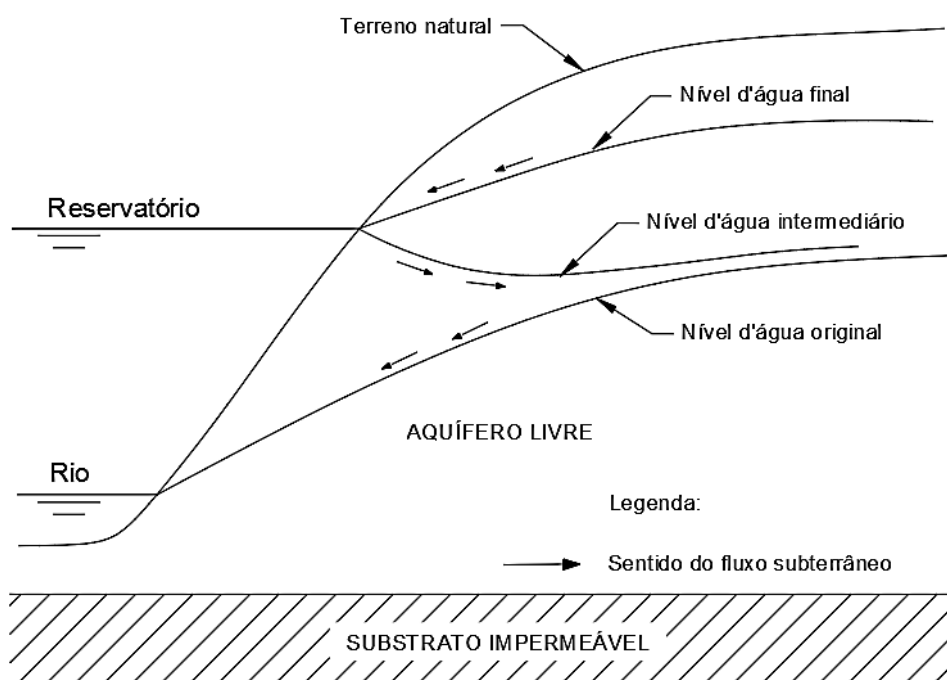
A implantação de grandes reservatórios artificiais resulta em grandes impactos na região afetada, sendo alguns destes impactos mesmo irreversíveis (YANG et al., 2012). Os impactos mais comuns e amplamente documentados são a alteração do padrão climático local, fragmentação de habitats, geração de gases de efeito estufa (metano), perda de biodiversidade e inundação de cidades e áreas agrícolas férteis (NEW; XIE, 2008; NILSSON; BERGGREN, 2000; YANG et al., 2012).

Outro efeito direto diz respeito à mudança (elevação) do nível do lençol freático na área no entorno do reservatório, impondo novas condições geotécnicas às encostas (CNEC, 1988a; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; VARNES, 1978). A Figura 1 ilustra a modificação do nível do lençol freático para a nova condição hidráulica quando do enchimento do reservatório.

Antes do enchimento do reservatório, o nível do lençol freático encontra-se mais elevado em relação ao rio, abastecendo-o. Quando a dinâmica hidráulica é alterada devido ao barramento, o nível freático é elevado na medida que o nível de reservatório aumenta. Durante esta elevação podem ocorrer deslizamentos nas encostas devido ao aumento da poropressão e diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (CNEC, 1988a; SANTOS JUNIOR et al., 2017). Apenas após um certo período de tempo após o término do enchimento do reservatório a rede de

fluxo do lençol freático adquire uma conformação similar à inicial (LAWSON, 1985; SANTOS JUNIOR et al., 2017).

Figura 1 – Representação esquemática da mudança do nível do lençol freático devido ao enchimento de um reservatório de água.



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

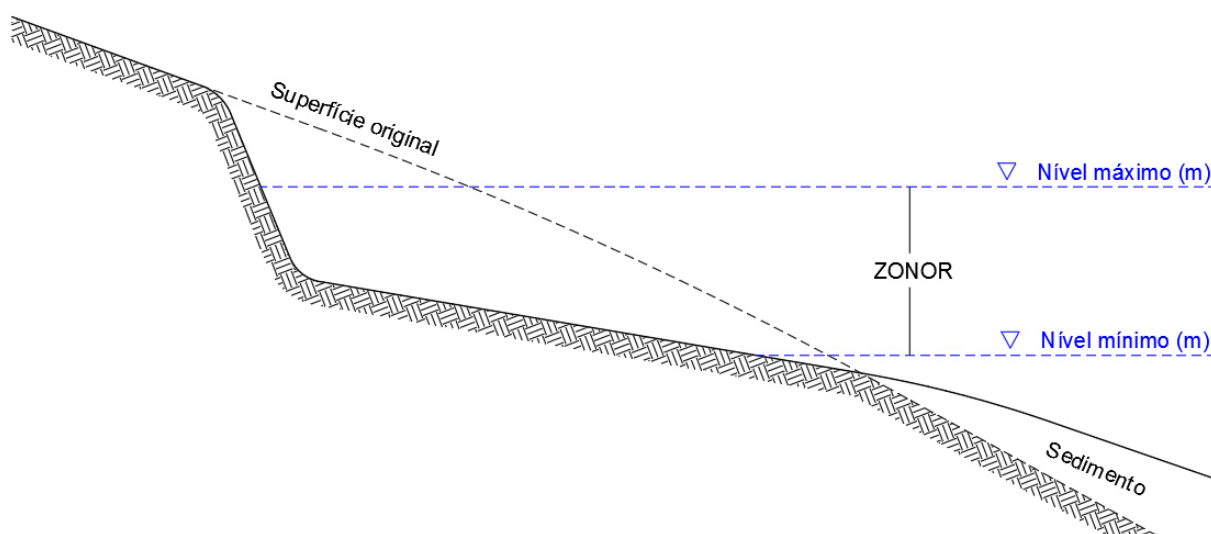
Após o enchimento e início da operação do reservatório, o nível da água passa a oscilar entre a cota máxima e mínima de operação. Estas cotas passam a ser os novos limites de flutuação fluvial, dando origem a uma faixa do terreno sujeita a intensas modificações geomorfológicas, que neste trabalho passará a ser denominada Zona de Oscilação do Nível de Operação do Reservatório (ZONOR).

## 2.2 A Zona de Oscilação do Nível de Operação do Reservatório (ZONOR)

A Zona de Oscilação do Nível de Operação do Reservatório (ZONOR) compreende a porção do terreno entre a cota máxima e a cota mínima de operação do reservatório. É a faixa de terreno que conecta os ecossistemas aquáticos e terrestres (BAO et al., 2018; BAO et al., 2015a; NILSSON; BERGGREN, 2000; NILSSON; SVEDMARK, 2002; YANG et al., 2012), sendo também denominada de Zona de Perturbação do Reservatório (BAO et al., 2018) ou Zona Ripária (BAO et

al., 2015b). A amplitude vertical desta zona é específica para cada empreendimento e pode variar de menos de um metro (Usina Hidrelétrica de Wloclawek, Polônia), poucos metros (Usina Hidrelétrica Itá, Brasil) até dezenas de metros (Usina Hidrelétrica das Três Gargantas, China). A Figura 2 exemplifica o conceito apresentado.

Figura 2 – Representação esquemática da Zona de Oscilação do Nível de Operação de Reservatórios (ZONOR) de usinas hidrelétricas.



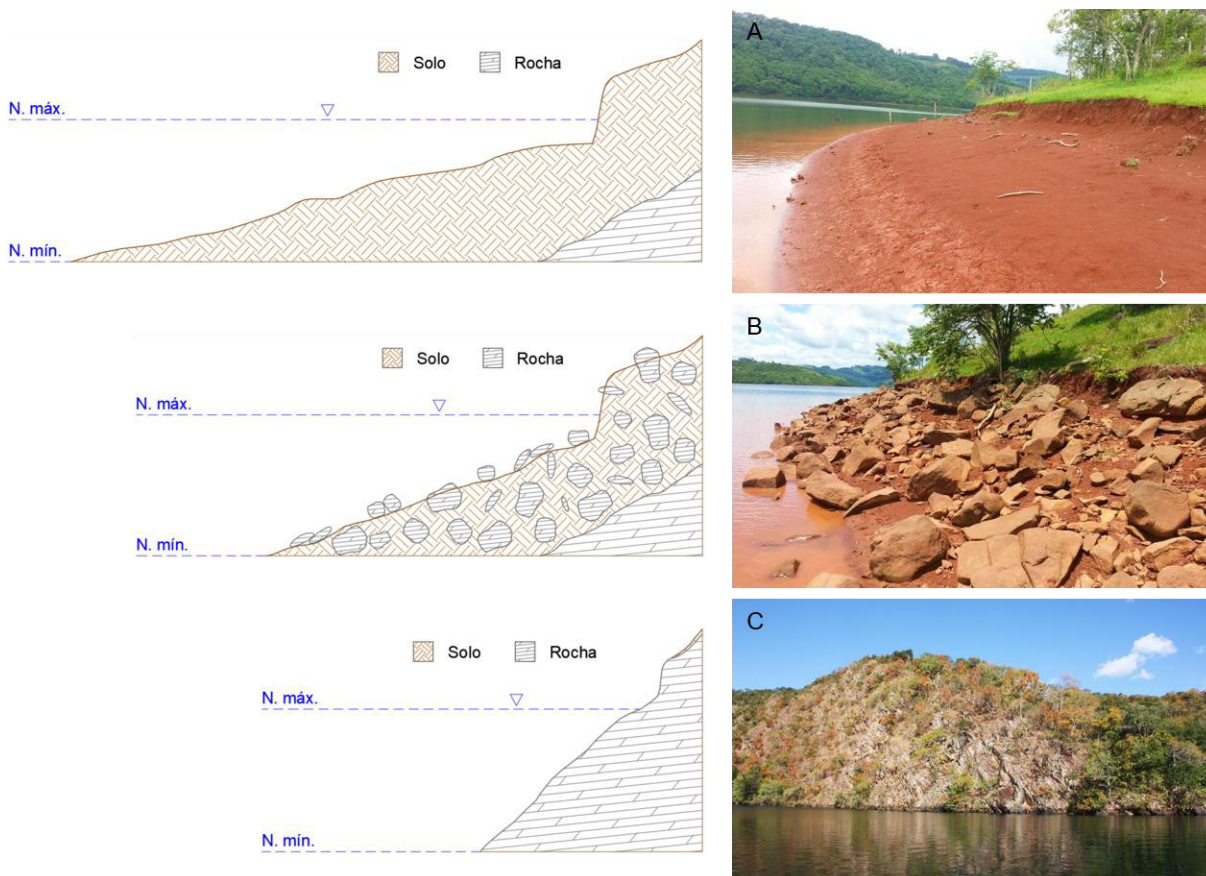
Fonte: O autor.

A ZONOR é formada no momento do enchimento total do reservatório e início da operação normal do empreendimento. A amplitude e frequência de oscilação do nível dependem de vários fatores concomitantes como o regime de chuvas anuais, a ocorrência de tempestades (BAO et al., 2018), a topografia e o uso do solo na bacia de contribuição, as dimensões do reservatório, a produção e o consumo de energia elétrica, entre outros. Na maioria dos casos, o nível de operação dos reservatórios permanece em cotas mais altas durante a estação chuvosa e em cotas mais baixas durante a estação seca.

Segundo Bao et al. (2015a), em estudos realizados para a Usina das Três Gargantas, a morfologia da ZONOR apresenta diversos padrões espaciais que podem geralmente ser classificados em três tipos. O primeiro tipo refere-se a taludes com inclinação inferior a 15°, com uma camada espessa de solo e largura maior que 100 m (Figura 3A). Devido à baixa declividade pode-se desenvolver esporadicamente vegetação esparsa (gramíneas e arbustos) durante o período em

que o nível do reservatório permanece baixo. Neste mesmo período os taludes estão sujeitos ao processo de escoamento superficial com formação de canais e sulcos, sendo, portanto, a porção mais dinâmica da ZONOR.

Figura 3 – Características morfológicas dos três tipos de taludes comumente encontrados em reservatórios, elaborado com base em Bao et al. (2015a) e adaptado para o reservatório da UHE Itá. A – Taludes sem blocos de rocha; B – Taludes com blocos de rocha em diferentes densidades. C – Taludes rochosos. N. máx. – nível máximo normal; N. mín. – nível mínimo normal de operação.



Fonte: O autor.

O segundo tipo refere-se a taludes que apresentam tanto solo quanto fragmentos de rocha e largura entre 60 m e 100 m (Figura 3B). A inclinação do talude se encontra entre  $15^\circ$  e  $25^\circ$  e a camada de solo varia ao longo do perfil. Os processos superficiais atuantes no talude são similares aos descritos para o primeiro tipo de morfologia.

O terceiro tipo refere-se a taludes inclinados ou muito inclinados com mais de  $45^\circ$ , podendo apresentar uma fina camada de solo (Figura 3C). Estes taludes apresentam a menor largura dentre os tipos descritos, sendo geralmente menor que 60 m. A superfície do talude pode estar recoberta por vegetação rasteira (musgos)

ou sequer apresentar vegetação. Este tipo de talude não permite a prática de cultivos e instalação de habitações, permanecendo praticamente em seu estado natural mesmo após o enchimento do reservatório. Movimentos de massa são predominantes neste ambiente e ocorrem ao longo de falhas ou contato entre rochas. Os fatores desencadeadores deste tipo de erosão são as pressões hidrostáticas e hidrodinâmicas durante o período de enchimento e pressões intersticiais da água durante o período de seca.

Apesar das larguras apresentadas para os taludes terem sido definidas para as margens do reservatório da UHE Três Gargantas, cabe destacar que os três tipos de padrões espaciais da ZONOR normalmente ocorrem em quase todos os reservatórios, sendo as larguras das faixas e as inclinações variáveis dependendo das características de cada empreendimento.

### 2.3 Dinâmica lacustre na ZONOR

As alterações qualitativas e quantitativas verificadas na ZONOR são resultado das interações entre a hidrodinâmica do reservatório e os processos geomorfológicos atuantes. O comportamento dos processos atuantes depende do ambiente natural (características geológicas e das condições climáticas), parâmetros do reservatório (CYBERSKI, 1973) e da oscilação do nível da água (BAO et al., 2015a; KACZMAREK et al., 2016). Estes fatores em conjunto tornam a ZONOR altamente frágil do ponto de vista ecológico (NEW; XIE, 2008) e edáfico.

Os reservatórios localizados em zonas baixas com relevo pouco ondulado ocupam a planície de inundação e uma porção do terreno imediatamente acima. Esta condição imprime processos geomorfológicos menos intensos às suas margens comparado a reservatórios localizados em vales encaixados de regiões montanhosas. Mesmo assim, o recuo de margens em reservatórios localizados em zonas baixas pode variar entre 5 e 10 m por ano (CYBERSKI, 1973).

As taxas erosivas tendem a ser maiores nos anos iniciais de operação do reservatório devido às instabilidades provocadas nas encostas pela alteração da dinâmica fluvial (KACZMAREK et al., 2016; NILSSON et al., 1997; VILMUNDARDÓTTIR et al., 2010), tendendo à estabilidade ao longo do tempo conforme as margens adquirem conformações geométricas mais estáveis.

Durante os primeiros anos de operação do reservatório os taludes ao longo do perímetro apresentam grandes inclinações, favorecendo o impacto de ondas com alta energia cinética. O resultado da dissipação da energia destas ondas são a desagregação e remoção de solo dos taludes. Deste processo resultam taludes inclinados com a ocorrência de fendas, tombamentos, colapsos e deslizamentos de solo ao longo da linha de água. Os taludes mais altos e verticais são os mais rápidos a recuar (BANACH, 2006) e constituem a principal fonte de sedimentos junto à margem (KACZMAREK et al., 2016).

As altas taxas erosivas nos anos iniciais ocorrem devido à inexistência de um talude suave próximo à margem, o qual contribui para a estabilização e dissipação da energia das ondas (CYBERSKI, 1973). Ao contrário, as ondas não encontram obstáculos e impactam diretamente os taludes verticais, danificando-os, restando às correntes de água o transporte do material desagregado para maiores profundidades (BANACH, 2006). Esta condição é intensificada pelos sucessivos rebaixamentos (rápidos ou lentos) do nível da água, resultando na diminuição da estabilidade geotécnica dos taludes e indução de movimentos de massa (BAO et al., 2015b; GERSCOWICH, 2016; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014; MASCARENHA et al., 2017; RODRIGUES, 2007).

Após o intenso desgaste das margens nos anos iniciais ocorre a formação de um talude/plataforma com baixa inclinação, dando início ao processo de abrasão. A abrasão inclui processos morfodinâmicos como lavação, esfrelamento, tombamento, deslizamento e dispersão (CYBERSKI, 1973). Nesta fase os deslizamentos de solo tendem a diminuir, a plataforma de abrasão tende a aumentar em largura e os sedimentos produzidos pelas ondas começam a ser transportados em maiores proporções ao longo da plataforma ao invés de serem arrastados para maiores profundidades. Os processos de abrasão e acumulação diminuem consideravelmente quando a plataforma de abrasão adquire uma superfície estável evidenciada pela presença de espécies vegetais espontâneas e organismos bentônicos. Outro indício da estabilidade das margens é o recobrimento da superfície do talude vertical por vegetação espontânea, indicando a interrupção de recuos (BANACH, 2006).

As taxas de abrasão impostas aos taludes estão diretamente relacionadas com a estrutura geológica, morfologia e a exposição dos taludes em relação às direções predominantes do vento. O fator mais preponderante neste processo, no



entanto, é o tamanho do reservatório. Em reservatórios muito grandes com centenas ou milhares de quilômetros quadrados de área superficial os processos podem ser tão intensos a ponto de as margens sofrerem recuos da ordem de dezenas de metros por ano (CYBERSKI, 1973). Os taludes de reservatórios localizados em vales encaixados de regiões montanhosas constituídos por material friável estão submetidos a processos geomorfológicos similares aos verificados em reservatórios de regiões baixas e planas. No entanto, margens rochosas e cascalhentas ou com pedregulhos sofrem processos de transformação diferentes. A abrasão atuante em margens rochosas é insignificante e pode ser desconsiderada. Já margens com pedregulhos/cascalhos que apresentam blocos de rocha de diferentes dimensões e material terroso na superfície do talude estão sujeitos a erosões de diferentes magnitudes comandadas pela granulometria e porosidade do material (CYBERZSKI, 1973).

O modelo de estabilidade de margens de reservatórios artificiais difundido nas décadas de 80 e 90 pressupunha modificações bruscas na zona de oscilação na fase inicial de uso do reservatório e um equilíbrio dinâmico na fase tardia, quando as taxas de modificação fossem similares à condição anterior ao enchimento. No entanto, o equilíbrio dinâmico das margens pode não ser observado em reservatórios com vários metros de oscilação sazonal anual do nível da água. Um exemplo é o reservatório Bratsk na Rússia (oscilação média anual de 4,0 m e área superficial de 5470 km<sup>2</sup>), que mesmo após 50 anos de operação continua a apresentar processos erosivos intensos em suas margens (1,4 m/ano de recuo da margem) (KACZMAREK et al, 2016).

O tempo necessário para atingir o equilíbrio dinâmico em pequenos<sup>2</sup> reservatórios localizados em relevos pouco ondulados e com oscilação anual do nível da água <0,5 m é de 5 – 10 anos, como por exemplo, os reservatórios no rio Slupia, na Polônia (área superficial <2 km<sup>2</sup>). Para reservatórios com oscilação do nível da água de 1,0 m/ano são necessários 12 – 20 anos até a estabilidade. À medida que a área superficial do reservatório e a amplitude de oscilação aumentam, o tempo requerido para a estabilização das margens também aumenta (BANACH, 2006). Taludes localizados mais próximos do barramento sofrem erosão (abrasão)

---

<sup>2</sup> Segundo classificação de BANACH (2006), reservatórios pequenos apresentam área superficial menor que 20 km<sup>2</sup>; reservatórios médios entre 20 – 100 km<sup>2</sup> e reservatórios grandes acima de 100 km<sup>2</sup>.

mais intensa e por mais tempo em comparação a taludes localizados nas porções centrais ou finais do reservatório (CYBERSKI, 1973). Reservatórios localizados em relevos declivosos e encaixados, os quais tendem a apresentar grandes oscilações anuais do nível da água, podem atingir a estabilidade das margens apenas após décadas de operação do reservatório (BANACH, 2006). A estabilidade pode até não ser atingida caso ocorra uma intensificação dos processos geomorfológicos ao longo do tempo (SPANILLA, 1998; NAZAROV, 2008 apud KACZMAREK et al., 2016). Por outro lado, quanto mais altos forem os taludes verticais localizados acima da cota máxima, maior é a velocidade de formação da plataforma de abrasão e, conseqüentemente, da estabilidade da margem (CYBERSKI, 1973).

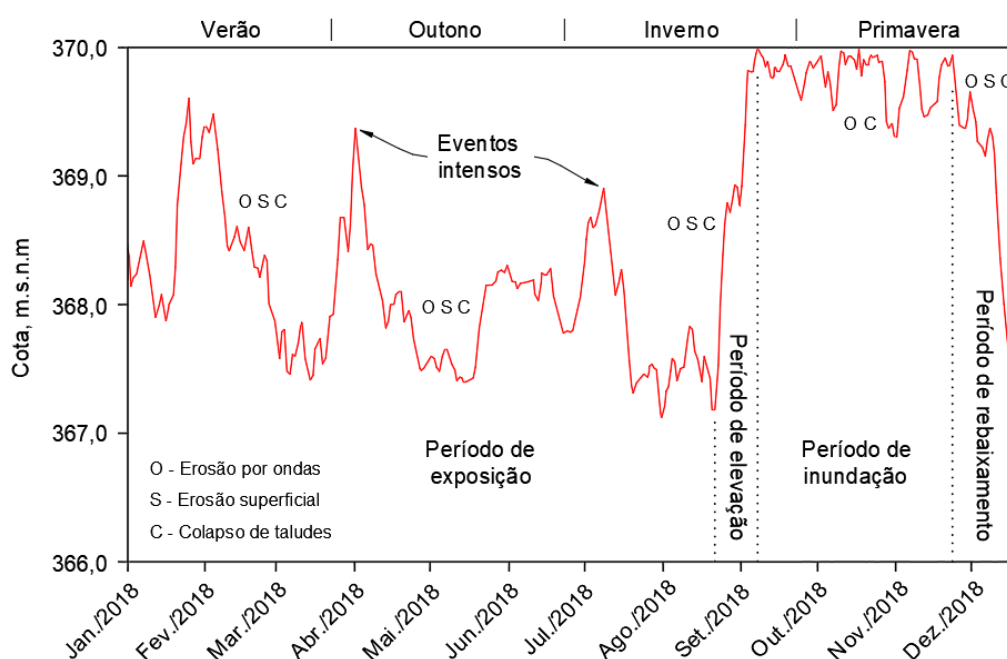
Conforme exposto acima, o tempo necessário para que as margens do reservatório atinjam a estabilidade está diretamente vinculado à amplitude de oscilação do nível da água. Quanto maior for esta amplitude, maior tenderão a ser as taxas erosivas nas margens. Segundo Bao et al. (2015a) e Bao et al. (2015b), o ciclo anual de oscilação do nível da água para reservatórios com grande amplitude de oscilação anual pode ser dividido em quatro períodos, que são:

1. Período de elevação: a movimentação de sedimentos se dá por erosão provocada pelas ondas e por colapso de taludes, havendo controle de movimentação de solo em caso de presença de plantas;
2. Período de inundação: a erosão do solo e o colapso de taludes na zona inundada são controlados pela hidrodinâmica lacustre. No entanto, a erosão na cota máxima é intensificada devido à hidrodinâmica intensa;
3. Período de rebaixamento: a presença de vegetação espontânea é (quase) inexistente devido à submersão prolongada e uma ampla faixa de solo desnudo é exposta quando o nível diminui. Grandes quantidades de solo podem ser removidas do talude exposto pela ação das ondas e do escoamento superficial. Neste período também se verifica uma maior intensidade de erosão causada por ondas, por escoamento superficial e colapso de taludes;
4. Período de exposição: o nível do reservatório permanece baixo, podendo ocorrer picos de oscilação devido a eventos chuvosos intensos. Nesta etapa as margens do reservatório permanecem expostas e sujeitas a processos erosivos superficiais, podendo ocorrer formação de pequenos

canais e sulcos. As porções dos taludes próximos do nível da água estão sujeitos a processos de colapso e erosão por ondas devido às frequentes oscilações do nível da água e da umidade do maciço. Nesta etapa também ocorre infiltração no reservatório à medida que o nível do lençol freático no maciço de solo é rebaixado.

A duração (meses) de cada período é variável entre reservatórios. A Figura 4 ilustra os quatro períodos acima descritos.

Figura 4 – Períodos hidrológicos do reservatório da Usina Hidrelétrica Itá (UHE Itá) para o ano de 2018. A figura foi elaborada considerando as nomenclaturas apresentadas por Bao et al., 2015b.



Fonte: O autor.

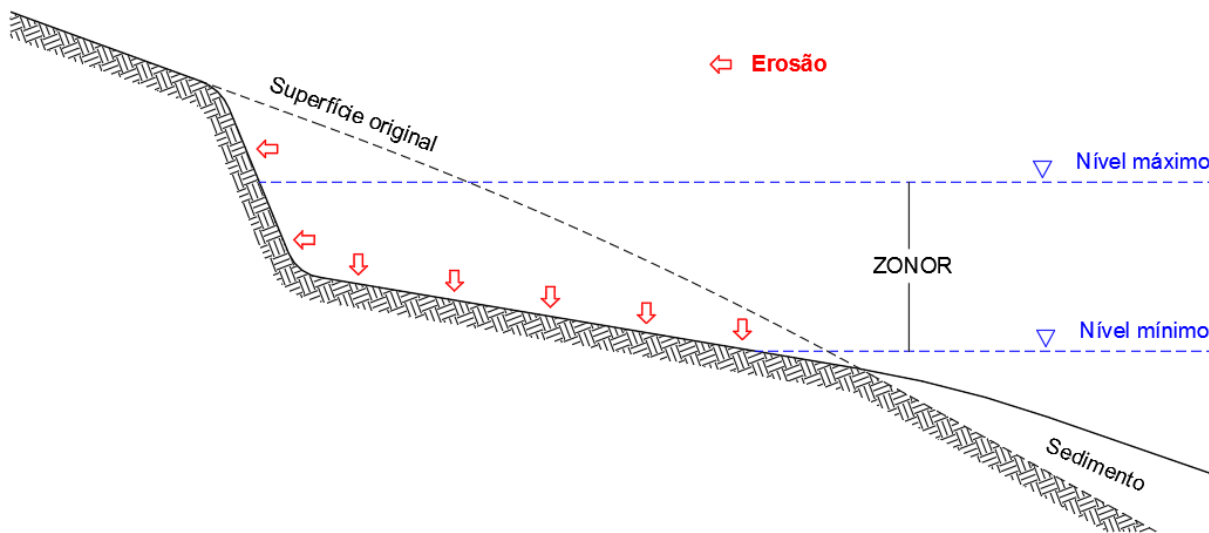
## 2.4 Fatores condicionantes das erosões na ZONOR

A bibliografia científica revela que o comportamento dos processos erosivos em margens de reservatórios é complexo e variável temporal-espacialmente (BAO et al., 2018; BAO et al., 2015a; CYBERSKI, 1973; SIQUEIRA et al., 2015). As variáveis que influenciam os processos geomorfológicos são bem conhecidas e hierarquizadas pelo meio acadêmico. No entanto, as interações entre si e os padrões de comportamento no longo prazo são difíceis de serem estabelecidos e

previstos (BANACH, 2006; NEW; XIE, 2008; KACZMAREK et al., 2016). Mesmo assim, é imprescindível que os processos erosivos sejam melhor compreendidos, de forma a viabilizar uma gestão mais sustentável de reservatórios ao redor do mundo (KACZMAREK et al., 2016; SU et al., 2017).

A erosão na zona de oscilação em evolução ocorre tanto no sentido longitudinal, conferindo recuo da margem, quanto no sentido vertical, provocando rebaixamento da plataforma em formação (Figura 5).

Figura 5 – Representação esquemática da erosão no talude vertical (sentido horizontal) e na plataforma em formação (sentido vertical) de uma margem em evolução geomorfológica.



Fonte: O autor.

Os fatores que influenciam direta ou indiretamente os processos de erosão e deposição são hidrológicos (BAO et al., 2018; CYBERSKI, 1973; HAMPTON et al., 2004; NAGLE et al., 2012; NEW; XIE, 2008; WOHL, 2014), topográficos (BANACH, 2006; GOVERS, 1992; KRONVANG et al., 2013), de solo (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2015b; SU et al., 2017), sedimentos suspensos na água (ALI, 2003; BAO et al., 2015; ZHU et al., 2016), escoamento superficial (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2015b), vegetativos (BAO et al., 2015b; KACZMAREK et al., 2016; VANNOPPEN et al., 2015; VILMUNDARDÓTTIR et al., 2010), velocidade e direção do vento (CYBERSKI, 1973; NRCS, 2014), dinâmica de oscilação do nível da água e embate de ondas (AZZA et al., 2007; BAO et al., 2015b; BAO et al., 2015a; CYBERSKI, 1973; JOHANSSON; NILSSON, 2002; KACZMAREK et al., 2016; NEW; XIE, 2008; REID, 1992). Apesar da importância dos demais, os dois últimos fatores são os mais importantes quanto à dinâmica erosiva e deposicional junto às margens (BAO et al.,

2015b; REID, 1992). Apesar de distintos, estes dois efeitos atuam concomitantemente nas margens e podem ser analisados em conjunto.

A remoção de solo nos taludes na faixa de oscilação do nível de operação do reservatório é principalmente decorrente da ação das ondas (CHU, 1992; MASCARENHA et al., 2017; NRCS, 2014; QUIGLEY; GÉLINAS, 1976; REID, 1992; SANTOS JUNIOR et al., 2017; SCS, 1983). Este processo ocorre em praticamente todas as margens do reservatório, sendo mais intenso em alguns trechos e menos intenso em outros (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 (DEWES, 2019).

Erosões causadas por ondas tendem a ser insignificantes na porção final do reservatório onde o *fetch* e a profundidade do reservatório são pequenos. Na porção central do reservatório e perto do barramento a profundidade da água e o *fetch* tendem a aumentar, favorecendo maior movimento de ondas e conseqüente abrasão nos taludes. Estes fenômenos são ainda mais intensos quanto mais elevado estiver o nível do reservatório (CYBERSKI, 1973).

A erosão por ondas em margens de reservatórios provoca múltiplos danos e impactos como perda de solo de uso econômico e/ou recreativo, aumento do transporte de sedimentos, indução de deslizamentos, danos a infraestruturas (estradas, casas, estaleiros, etc) (LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992), perda de biodiversidade (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2018), degradação de áreas de planície, danos a sítios arqueológicos, danos a habitats aquáticos (GOLDSMITH, 1992; PORTER, 1992; NEW; XIE, 2008; ZABAWA; RATCLIFFE; HOCHHEIMER, 1992), entre outros. Além disso, a perda de solo nas margens contribui para o assoreamento do reservatório (BAO et al., 2010), diminuindo a vida útil do mesmo.

Quando a inclinação do fundo junto à margem é grande, então ocorre o processo de solapamento e movimentação de sedimentos. Isto se dá porque uma nova inclinação mais estável necessita ser atingida, resultando numa plataforma de abrasão com inclinação menor que a inclinação das encostas adjacentes acima do nível máximo do reservatório (Figura 2) (FERNANDEZ; FULFARO, 2000; FORMIGA;

VASCO; PEREIRA, 2017; LAWSON, 1985). Quando ocorre uma intensa remoção dos sedimentos pelas correntes de água e ondas da plataforma de abrasão, esta demora a ser formada. Já quando o sedimento advindo de posições superiores do talude é depositado na plataforma de abrasão, esta pode ser formada mais rapidamente, contribuindo para a dissipação da energia das ondas (CYBERSKI, 1973).

A formação das ondas na superfície do reservatório é resultante de fenômenos naturais (vento) ou antrópicos (circulação de embarcações) (BAO et al., 2015a; CHU, 1992; MASCARENHA et al., 2017; NRCS, 2014; PORTER, 1992). Em relação à intensidade de ação das ondas, as maiores taxas de erosão ocorrem durante tempestades ou vendavais com ventos fortes. Estes eventos podem induzir ondas maiores que 2 m de altura no corpo de reservatórios com grande área superficial (FORMIGA; VASCO; PEREIRA, 2017). A conformação das encostas no entorno do reservatório também tem grande importância neste fenômeno. Margens de reservatórios localizadas em vales encaixados estão sujeitas à ação de ventos confinados e com maiores velocidades comparadas às margens localizadas em relevos levemente ou pouco ondulados (SU et al., 2017). Como a velocidade do vento está diretamente relacionada com a altura (Equação 1) e a energia (Equação 2) das ondas (NRCS, 2014), existe uma tendência dos processos geomorfológicos serem mais intensos em margens de reservatórios localizados em regiões topograficamente acidentadas (NEW; XIE, 2008).

$$H_s = 0,0232V_s^{1,06}F_E^{0,47} \quad (1)$$

em que:  $H_s$  é a altura significativa da onda;  $V_s$  é a velocidade do vento na superfície da água; e  $F_E$  é o *fetch* efetivo.

$$E_T = \frac{\rho g H_s^2 L}{8} \quad (2)$$

em que:  $E_T$  é a energia total da onda;  $\rho$  é a massa específica  $g$  é a gravidade;  $H_s$  é a altura significativa da onda; e  $L$  é o comprimento de onda.

Não somente a velocidade do vento, mas também o *fetch* influencia a altura e energia das ondas e, conseqüentemente, as taxas erosivas nas margens. O *fetch* é

a maior distância ininterrupta sobre a superfície da água sobre a qual o vento sopra produzindo ondas (NRCS, 2014).

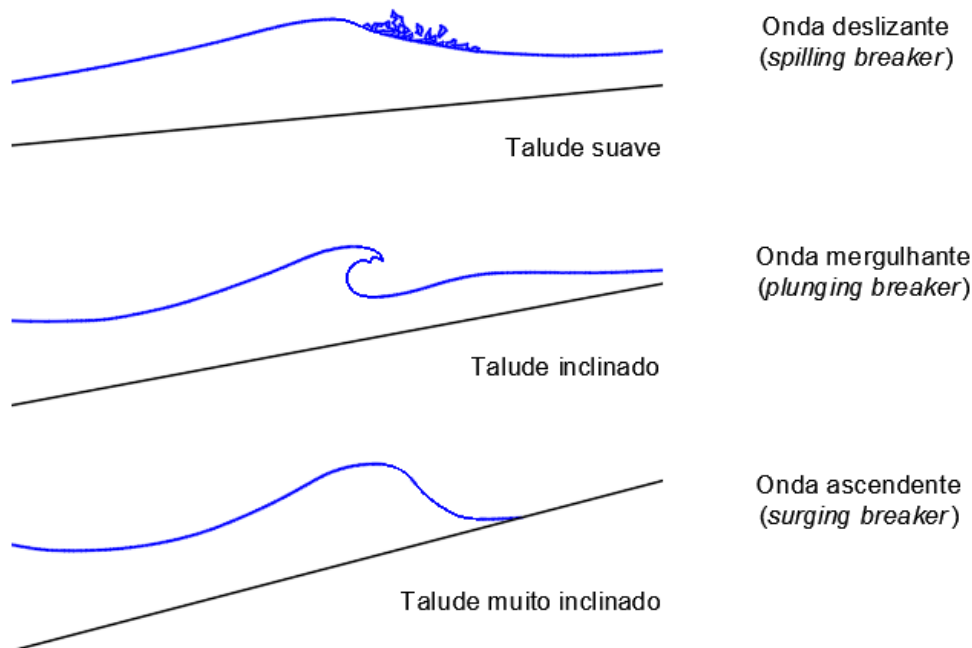
Taludes orientados a favor de um *fetch* maior tendem a sofrer maiores perdas de solo pelas ondas. Taludes localizados e orientados em locais com *fetch menor* tendem a sofrer processos erosivos menos intensos (CYBERSKI, 1973; REID, 1992). Os focos erosivos localizados no corpo principal do reservatório tendem a ser mais intensos em comparação aos localizados nos tributários (BAO et al., 2015b; BAO et al., 2018; SU et al., 2017), devido à tendência de ocorrência de *fetchs* maiores no corpo principal e mais a jusante no reservatório comparado aos tributários e porções mais a montante (SU et al., 2017).

Enquanto a velocidade do vento e o *fetch* comandam a altura das ondas, a geometria da plataforma de abrasão influencia o tipo de onda produzida próximo da margem. Basicamente existem três tipos de rebentação de ondas (deslizante, mergulhante e tubular ou ascendente), os quais são verificados tanto em ambientes litorâneos quanto em margens de reservatórios (COKELET, 1977; HACKER; JOHANNSEN, 2012; KFK, 2007). Os formatos da crista e da forma de rebentação são função da inclinação da plataforma de abrasão e da declividade das ondas (LAWSON, 1985), como pode ser observado na Figura 6.

A crista da onda deslizante torna-se gradualmente íngreme e começa a rebentar de forma suave com formação de espuma e bolhas de água devido ao 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 onda ascendente não rebenta propriamente dita, já que as mesmas ascendem o talude com formação de espuma e bolhas de água (LAWSON, 1985).

As ondas deslizantes ocorrem em plataformas com baixa inclinação de fundo. Já as mergulhantes tendem a ocorrer em plataformas com inclinações de fundo médias, enquanto as ascendentes ocorrem em plataformas com grande inclinação. As ondas deslizantes dissipam sua energia de forma eficiente ao longo de uma plataforma suave e alongada. Por outro lado as ondas ascendentes dissipam a energia rampeando o talude (WIEGEL, 1992; WOOD; FLEMING, 1981).

Figura 6 – Diferentes tipos de ondas a depender da inclinação da plataforma de abrasão.



Fonte: Adaptado de KFK (2007).

Para 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). No entanto, ondas do tipo mergulhante transportam mais sedimentos do que ondas do tipo deslizante devido à maior capacidade de suspender material fino (KANA, 1979). Por este motivo, ondas do tipo mergulhante apresentam grande importância na escavação e remoção de sedimentos junto à margem devido à maior energia dissipada no momento da rebentação (COKELET, 1977).

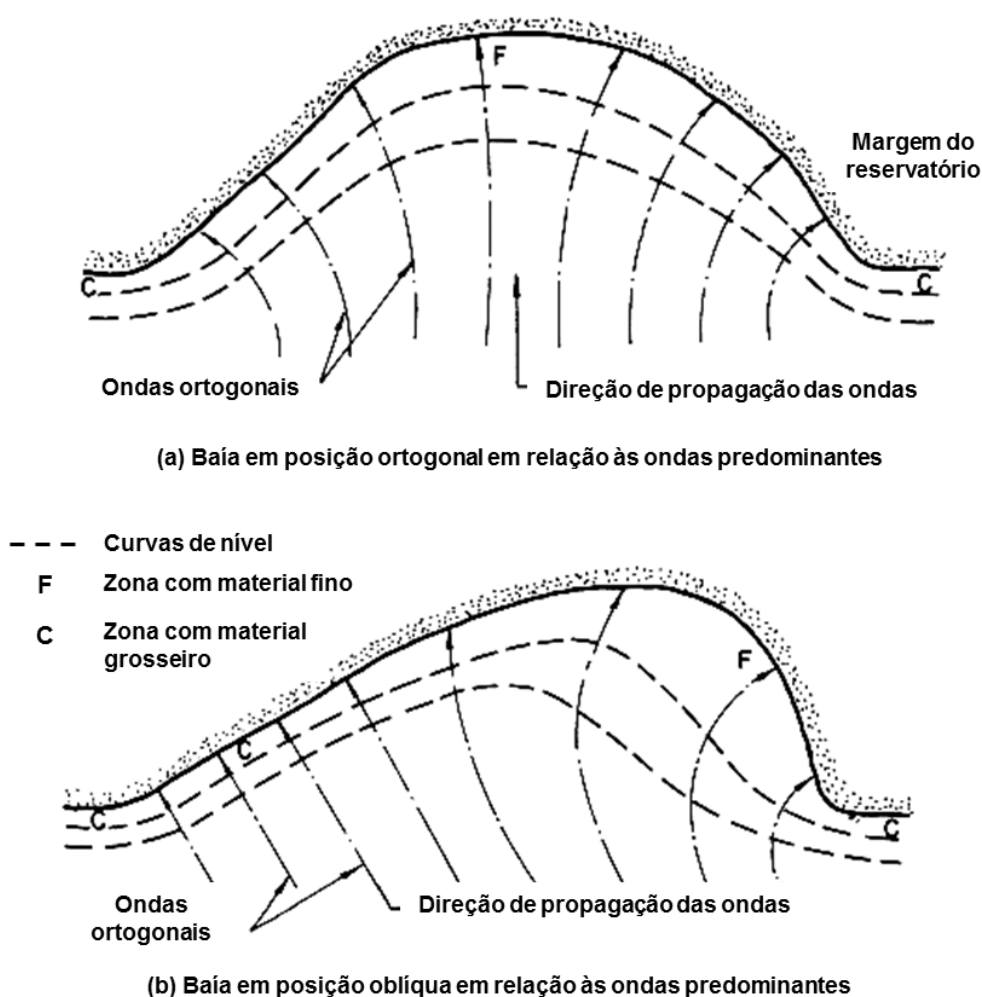
De modo a descrever a intensidade da erosão causada pelas ondas, Bao et al. (2015a) orienta para a necessidade de pesquisas que relacionem as causas de indução de ondas (*fetch* e velocidade do vento) com o quantitativo de material erodido em diferentes cotas. A partir das relações estabelecidas deve-se buscar determinar a proporção da erosão provocada pelas ondas e a influência relativa de cada variável neste processo.

Outro aspecto pertinente é o relacionado à topografia submersa junto à margem, que induz a convergência e divergência de ondas. As ondas divergem ou convergem porque a direção de propagação das mesmas ocorre aproximadamente



perpendicular em relação às curvas de nível do terreno submerso (LAWSON, 1985). Desse modo, zonas convergentes concentram ondas mais altas e com maior energia, resultando em plataformas de abrasão com maiores inclinações. Em zonas divergentes as ondas apresentam menor altura e menor energia, resultando em plataformas de abrasão com menores inclinações (LAWSON, 1985), conforme pode ser observado esquematicamente na Figura 7.

Figura 7 – Convergência e divergência de ondas em função da topografia submersa das margens e direção predominante de propagação das ondas.



Fonte: Adaptado de WOOD; FLEMING (1981).

Isto sugere que diferentes pontos em um segmento de margem com topografia irregular podem estar sujeitos a processos erosivos com intensidades distintas. As zonas de penínsulas são mais afetadas por ondas convergentes, resultando na predominância de material grosso nos taludes. Já as zonas de

baías estão mais protegidas topograficamente, havendo predominância de ondas divergentes e presença de materiais finos.

O solo erodido por abrasão pelas ondas pode ser transportado e depositado nas margens adjacentes. Este efeito ocorre quando há formação de correntes de água induzidas pelas ondas que incidem tangencialmente as margens, erodindo e transportando o solo lateralmente. No entanto, a presença ou ausência de correntes em um determinado momento e localização é que determina a posição ou local de acumulação do sedimento transportado. A maior intensidade deste processo coincide com a intensa ação das ondas e incidência tangencial em relação às margens, embora também ocorra quando a ação das ondas é mais branda. Estas particularidades tornam o processo excepcionalmente variável (CYBERSKI, 1973).

Após uma breve análise sobre ondas e de alguns fatores que contribuem ou retardam a sua ação na margem, devemos considerar agora a influência da oscilação anual do reservatório. As ondas solicitam e erodem os taludes na cota em que se encontra momentaneamente o nível da água. À medida que o nível oscila ao longo do ano, os processos erosivos acompanham essa oscilação e vão erodindo diferentes trechos do talude localizados entre a cota máxima e mínima de operação do reservatório. Quanto maior for o número de oscilações durante o ano, maior será o número de vezes que as ondas atingirão diferentes cotas e maior tenderá a ser o desgaste dos taludes. Diferentes taxas de erosão também podem ocorrer em diferentes cotas no talude, a depender do tempo de permanência do nível da água em determinada posição (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2015b; HAMPTON et al., 2004; SU et al., 2017), bem como da suscetibilidade do material à erosão e das características geométricas do talude.

Taludes de reservatórios constituídos de solos arenosos e fino-siltosos são facilmente erodidos, sendo os solos arenosos mais vulneráveis (CYBERSKI, 1973). Taludes argilosos são menos afetados pela erosão devido às forças coesivas existentes entre partículas em comparação a solos que não apresentam estas características (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). A ocorrência de colapsos e erosões em taludes é maior em solos arenosos finos e arenosos argilosos quando comparado a solos argilosos (BAO et al., 2015a). Os fatores determinantes para o colapso são a sollicitação gerada pelas ondas e a umidade do maciço (BAO et al., 2015b).

Já em relação à inclinação, quanto mais inclinado o talude for, mais instável ela tenderá a ser (GOOD, 1992; NEW; XIE, 2008; REID, 1992). Grandes inclinações dos taludes podem resultar do efeito do sistema radicial de plantas no topo do talude e pelas propriedades coesivas dos materiais (MASSAD, 2010). Taludes inclinados tendem a apresentar seu centro de gravidade em posições desfavoráveis do ponto de vista geotécnico, podendo resultar em deslizamentos (DURLO; SUTILI, 2014). Taludes inclinados são solicitados mais intensamente devido a existência de maiores tensões normais e resistência de atrito ao rompimento do solo (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Com a correção da geometria pode-se melhorar de forma imediata e permanente a estabilidade do talude, minimizando a ocorrência de rompimentos (GERSCOWICH, 2016; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO; NUMMER, 2014; MASSAD, 2010).

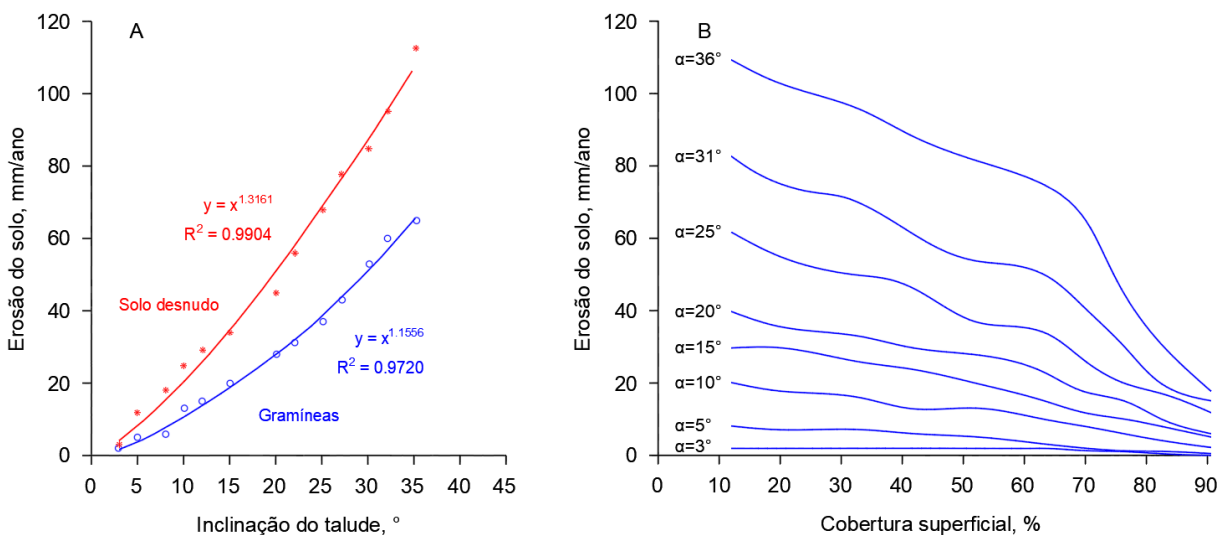
A altura dos taludes também é importante porque influencia no quantitativo de solo erodido (CYBERSKI, 1973) e na velocidade de evolução dos mesmos (CASADO et al., 2002; REID, 1992; THORNE; TOVEY, 1981). Este fator também é importante no estudo da evolução de margens fluviais naturais localizadas em trechos sinuosos ou meandantes (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). Quanto maior for a altura do talude, maior tende a ser o volume de solo erodido durante eventos intensos. No entanto, a formação de taludes altos só ocorre em relevos com topografia acidentada, como geralmente é o caso 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 o impacto da gota da chuva, o escoamento superficial, a erosão eólica, ciclos sucessivos de umedecimento e secagem da superfície com desprendimento do solo em placas, dentre outros (DEWES, 2019; REID, 1992). Segundo Reid (1992), taludes com mais de 9,0 m de altura podem apresentar até três vezes mais solo depositado em sua base quando comparados com taludes entre 4,5 m e 9,0 m de altura.

As constatações apresentadas mostram que os processos erosivos em margens de reservatórios são complexos e vários são os fatores que condicionam o seu comportamento (CHU, 1992; LAWSON, 1985; LYONS; HARRIS, 1992).

## 2.5 Modelagem de processos erosivos na ZONOR

Conforme mencionado anteriormente, os processos erosivos atuantes em margens de reservatórios tendem a ser complexos e, portanto, o seu comportamento é de difícil compreensão. Atualmente existe pouco conhecimento sobre o impacto do armazenamento de água nos processos erosivos atuantes na ZONOR (BAO et al., 2018). Apesar da imensa quantidade de reservatórios de água existentes em todo o mundo destinados a diversos usos, considerando reservatórios pequenos a grandes, torna-se evidente que o estudo do comportamento de erosões em margens de reservatórios ainda não recebeu a devida atenção e análise necessária e adequada. Ainda são escassos na literatura os modelos e relações matemáticas como os apresentados na Figura 8 que descrevam os fenômenos na zona de oscilação do nível da água para o reservatório como um todo.

Figura 8 – Taxas de erosão do solo verificadas na ZONOR da Usina Hidrelétrica das Três Gargantas, China. A - Erosão do solo em função da inclinação do talude dentro da faixa de oscilação do reservatório considerando solo sem e com cobertura vegetal. B - Erosão do solo em função da cobertura superficial do solo considerando taludes com diferentes inclinações.



Fonte: Adaptado de BAO et al. (2018).

Conforme pode ser observado, a intensidade dos processos erosivos tende a aumentar quanto maior for a inclinação média do talude. Por outro lado, quanto maior a cobertura superficial do talude por vegetação, menor tenderá a ser a intensidade dos processos.

A provável justificativa da inexistência destes modelos matemáticos é a pequena abrangência espacial e temporal das medições quantitativas de erosões conduzidas a campo. Para compreender adequadamente o comportamento das erosões nas diferentes porções do reservatório é necessário instalar um grande conjunto de pontos de monitoramento em trechos com processos erosivos, o que resulta em maior quantidade de recursos financeiros e logísticos direcionados ao monitoramento. Além disso, estes pontos devem ser monitorados por um longo período de tempo, de modo a investigar a evolução temporal dos fenômenos observados (aumento ou redução da intensidade das erosões).

## 2.6 Controle de processos erosivos na ZONOR

As margens de lagos naturais e reservatórios artificiais sofrem frequentemente processos geomorfológicos comandados principalmente por ondas induzidas pelo vento, causando degradação das funções ecológicas na zona ripária do entorno dos corpos de água (NEW; XIE, 2008; NRCS, 2014). A deflagração destes processos ocorre o ano inteiro (BAO et al., 2015a), sendo mais pronunciados em alguns pontos de margens do que em outros.

As constantes oscilações do nível da água do reservatório durante o ano reduzem drasticamente as espécies vegetais originais dentro da ZONOR (HUANG, 2001; JIANG et al., 2005; NEW; XIE, 2008; NILSSON; BERGGREN, 2000; YANG et al., 2012). A partir da operação normal do reservatório, as constantes oscilações do nível da água promovem a remoção da vegetação existente, abrindo lacunas no relevo que poderão ser recolonizadas tanto por espécies autóctones como exóticas (NEW; XIE, 2008; NILSSON; BERGGREN, 2000; YANG et al., 2012). Devido às diferentes capacidades em resistir à inundação, algumas espécies conseguem sobreviver e permanecer no local (BAO et al., 2015a). Com isso ocorre seleção e redistribuição de espécies ao longo das cotas de inundação (WANG et al., 2011 apud BAO et al., 2015a), ou seja, espécies mais resistentes à submersão conseguem colonizar o talude em cotas mais baixas dentro do reservatório em comparação às espécies menos tolerantes. A sobrevivência das espécies vegetais é facilitada na presença de adaptações morfofisiológicas favoráveis que permitam resistir a longos períodos de submersão e deficiência de oxigênio (lenticelas, raízes

adventícias, aerênquima), baixas temperaturas no inverno e períodos de seca no verão (xerofilia) (YANG et al., 2012).

As plantas exercem função central como agentes mitigadores da intensidade da erosão atuante através da redução da energia cinética e do poder erosivo das ondas. Este efeito é proporcionado por meio da parte aérea que estabelece uma barreira flexível e permeável ao longo da margem e pelo aumento da estrutura e reforço mecânico do solo através das raízes (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2015b; NRCS, 2014).

O início do estabelecimento espontâneo de plantas na zona de oscilação ocorre a partir do momento em que a plataforma de abrasão atinge o seu equilíbrio dinâmico. O equilíbrio é atingido quando os processos de erosão dos taludes e a acumulação do material erodido na plataforma de abrasão são reduzidos consideravelmente. Para o caso do reservatório Wloclawek (Polônia) com área superficial de 70 km<sup>2</sup> e oscilação anual <1,0 m, esta condição foi alcançada entre 12 e 20 anos após o enchimento do reservatório (BANACH, 2006).

Johnson (2002) constatou por meio de fotografias aéreas do lago McConaughy formado em 1941 (Estados Unidos) o restabelecimento de uma zona ripária similar à condição natural. As espécies colonizadoras autóctones constituíam-se dos gêneros *Populus* e *Salix*, as quais colonizaram relativamente rápido as novas margens formadas. Espécies mais tolerantes à inundação e de menor porte estabeleceram-se em cotas mais baixas dentro do reservatório e espécies arbustivas e arbóreas em cotas mais altas. Nilsson & Berggren (2000) também verificaram a formação de uma nova zona ripária ao longo de reservatórios no norte da Suécia 30 anos após a construção das barragens. Apesar da recomposição, a densidade de espécies não atingiu o nível preexistente, havendo inclusive redução na densidade de espécies a partir dos 30 anos.

Para New & Xie (2008) e Nilsson & Berggren (2000), o sucesso deste tipo de recomposição da flora ripária está diretamente relacionado à existência e manutenção de comunidades vegetativas à montante do reservatório (canal principal e rios tributários), pois estas atuam como fonte de sementes e propágulos a serem disseminados a jusante. No entanto, fatores como erosão pelas ondas, tamanho do reservatório, taludes inclinados e instáveis e oscilação da água têm limitado a recolonização espontânea apenas a taludes com baixas inclinações ou localizados em baías protegidas da intensa dinâmica lacustre. A inexistência de um padrão geral

do comportamento do reservatório, somado à impossibilidade de determinação de uma escala temporal, torna irrealista qualquer previsão prévia do tempo necessário para o estabelecimento de uma nova vegetação ripária, sendo seguramente necessárias algumas décadas (NIE; XIE, 2008).

Quando a recolonização vegetal anual dos taludes ocorre, esta se dá de forma lenta em comparação à dinâmica de oscilação do reservatório. Para o reservatório da Usina Hidrelétrica das Três Gargantas (China), que apresenta grande amplitude de oscilação da água, a vegetação rasteira consegue estabelecer-se esparsamente nas porções mais próximas da cota máxima, tornando-se cada vez mais esparsa em direção a cotas mais baixas dentro do reservatório, mesmo com a camada de solo sendo mais espessa e rica em matéria orgânica. Durante a época de seca, o nível da água pode oscilar rapidamente devido a tempestades e eventos chuvosos intensos, diminuindo a probabilidade de estabelecimento de plantas em cotas inferiores (BAO et al., 2015a). Na ampla maioria dos casos as plantas sequer conseguem estabelecer-se espontaneamente próximo da cota máxima, tendo que se valer e combinar intervenções de engenharia para controlar as erosões e para dar suporte ao desenvolvimento inicial das plantas.

As soluções técnicas clássicas para a proteção dos taludes contra a ação das ondas consistem em duas categorias: blindar o talude para resistir à energia das ondas ou dissipar a energia das ondas antes que estas atinjam o talude (NRCS, 2014). As estruturas tradicionais são *rip-rap* (enrocamento), elementos pré-moldados em concreto, gabiões, paliçadas, bolsas de solo-cimento ou de concreto, *crib-wall*, geomantas ou geocélulas, além do uso de produtos de reforço superficial do solo (CHU, 1992; GOOD, 1992; JUHLE; ALLEN, 1992; NRCS, 2014; PORTER, 1992; SALES et al., 2017). No entanto, o emprego destas técnicas em reservatórios é muito dispendioso e muitas vezes não resolvem tecnicamente o problema. Quando o fazem geralmente é de forma temporária seguido da necessidade de manutenção obrigatória (COPPIN; RICHARDS, 2007; FERNANDES; FREITAS, 2011; SOUSA, 2019). Como alternativa às técnicas tradicionais podem ser utilizadas técnicas de construção mais simples e que considerem plantas em seus dimensionamentos estruturais.

## 2.7 Engenharia Natural aplicada a reservatórios de água

Soluções alternativas de intervenção que podem e que estão a ser adotadas são intervenções baseadas em conceitos e 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). Algumas tentativas foram conduzidas em grandes reservatórios nos Estados Unidos (REID, 1992) e recentemente vêm sendo aplicadas também no Brasil (SOUSA et al., 2018; SOUSA, 2019; SUTILI et al., 2017). Os resultados preliminares do desempenho de intervenções implantadas em larga escala em alguns reservatórios no sul e sudeste brasileiro são muito promissores, apesar da reduzida experiência tecnológica, projetual e executiva acumulados até o momento, inclusive a nível mundial. Cabe destacar que o controle de erosões com técnicas de Engenharia Natural em margens de reservatórios de água é inovador a nível mundial e possui enorme potencial para desenvolvimento de novos nichos de mercado, avanços tecnológicos, projetuais e executivos.

A Engenharia Natural prioriza o uso de plantas, que podem ser combinadas com estruturas inertes, para a estabilização de taludes lacustres, fluviais e encostas naturais. Este tipo de abordagem apresenta menor impacto, é de fácil instalação e apresenta pouca manutenção em comparação às soluções tradicionais. As intervenções de Engenharia Natural apresentam menor custo de execução relativamente às obras tradicionais de engenharia (FERNANDES; FREITAS, 2011; SOUSA; DEWES; SUTILI, 2018, 2019), podendo ser utilizadas independente ou complementarmente às soluções tradicionais.

Outra vantagem das técnicas de Engenharia natural é a capacidade da componente vegetal em se reestabelecer na maioria das vezes quando danificada, ao contrário das estruturas rígidas e inertes. A resiliência das intervenções decorrente da capacidade das plantas de se reestabelecer no meio faz com que as obras apresentem eficiência técnica crescente no longo prazo (SOUSA, 2015), o que contribui para a continuidade do atendimento dos critérios para as quais foram projetadas. Além disso, o uso de plantas permite ainda inúmeros ganhos ecológicos, estéticos e paisagísticos (NRCS, 2014; SOUSA, 2015).

A Engenharia Natural valoriza a utilização de materiais construtivos inertes locais (madeira, blocos de rocha, solo) e materiais construtivos vivos (estacas vivas,



ramos vivos), e apresenta soluções construtivas de menor complexidade estrutural e executiva em comparação à maioria das soluções clássicas de engenharia. Estes aspectos são especialmente importantes quando se pretende controlar processos erosivos em diferentes pontos ou em larga escala ao longo do perímetro de reservatórios. Isto porque os acessos ao longo do reservatório geralmente são difíceis, impossíveis ou inviáveis do ponto de vista técnico e ambiental. Neste sentido, as soluções de Engenharia Natural, por apresentar caráter menos complexo, valorizar materiais construtivos locais e demandar mão de obra menos especializada na fase executiva de obra, permitem ganhos substanciais em termos logísticos, financeiros e executivos. Em última análise, estes fatores são cruciais para viabilizar a implantação de obras em larga escala e em locais remotos e de difícil acesso, como geralmente é o caso de margens de reservatórios, especialmente os localizados em regiões onduladas e declivosas.

A implantação de técnicas de Engenharia Natural em margens de reservatórios deve considerar as solicitações impostas pela dinâmica lacustre em cada subtrecho de margem, não sendo recomendada a adoção de uma solução construtiva padrão para todo o reservatório. Há pontos de margens que estão submetidas a maiores solicitações do que outros, tornando-se necessário identificar e mensurar estas solicitações para que se possa projetar soluções construtivas otimizadas para cada local considerando aspectos financeiros, tecnológicos e executivos. Na maioria dos casos faz-se necessária a combinação de materiais construtivos inertes e vivos para um controle efetivo dos processos erosivos.

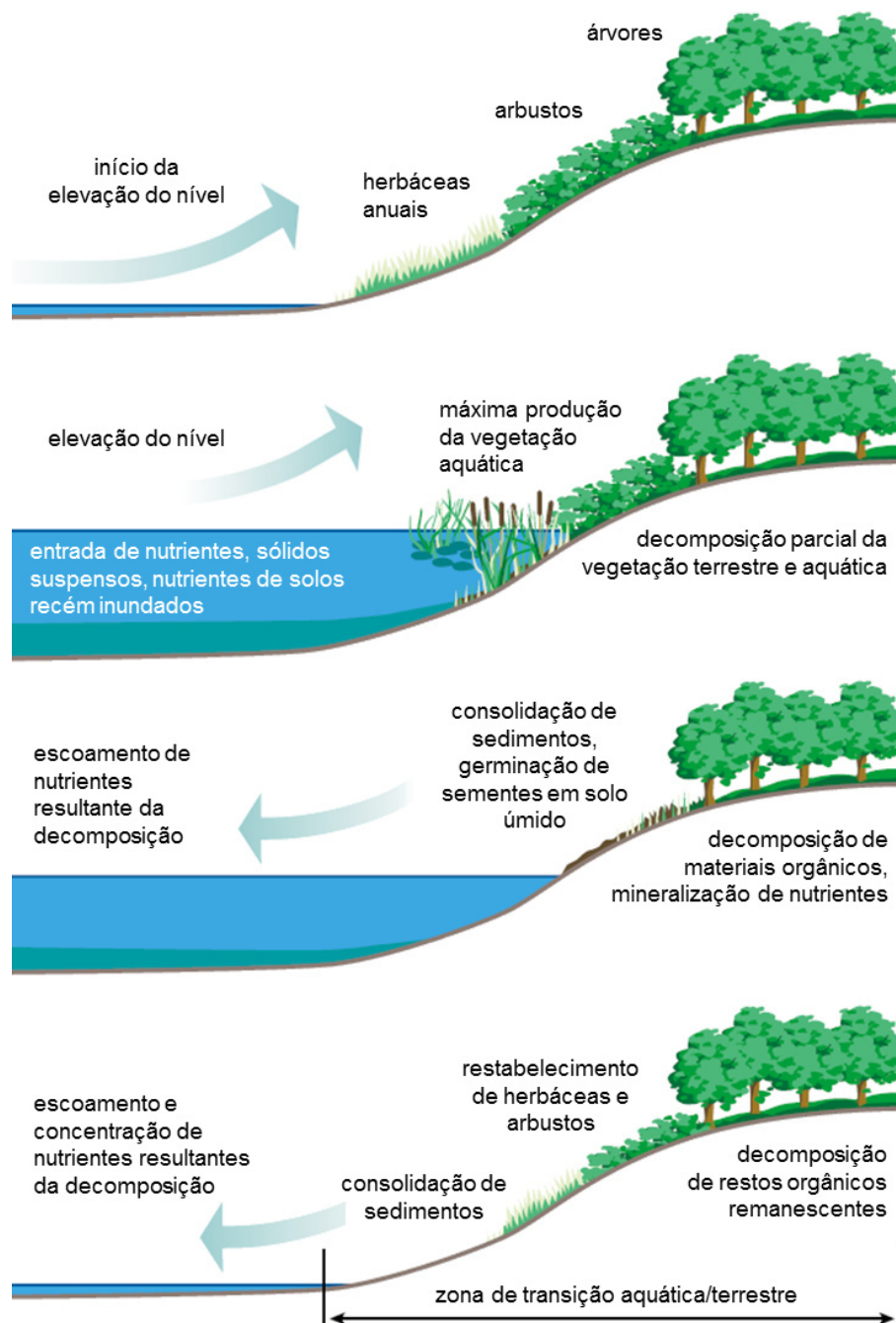
O uso apenas de plantas para dissipar a energia das ondas não é aplicável em todas as situações. Quando o *fetch* efetivo for maior que 490 metros, as plantas isoladamente podem não conseguir absorver a energia das ondas, sendo necessário o uso combinado com estruturas inertes para uma efetiva estabilização. Para *fetchs* efetivos <150 m, a inclinação máxima da plataforma de abrasão deve ser de 1V:10H (5,7°) quando se utilizam apenas plantas, sem combinação com materiais inertes, para dissipação da energia das ondas. Em caso de *fetchs* >150 m a inclinação deve ser de 1V:15H (3,8°) (NRCS, 2014; SCS, 1974). Plataformas de abrasão com no máximo 4,0° de inclinação em princípio não estão sujeitas a perda de solo (CYBERSKI, 1973).

Grandes reservatórios de água frequentemente apresentam taludes com inclinações maiores do que os permitidos para uso apenas de plantas no controle de erosões. A alternativa então é combinar materiais construtivos inertes (blocos de rocha, madeira, geotêxteis, etc) com materiais construtivos vivos (plantas e partes de plantas), de modo a aumentar as taxas de sucesso das intervenções. Segundo Chu (1992), a eficácia das estruturas depende da sua rigidez, porosidade e altura e recomenda o uso de soluções mais simplificadas como as da Engenharia Natural em locais onde a altura das ondas não exceda entre 0,90 m e 1,5 m.

Outras questões técnicas pertinentes dizem respeito à altura das espécies e densidades de plantio que potencializem a dissipação das ondas e o reforço do solo (BAO et al., 2015a). Estas respostas devem ser obtidas com base no levantamento das espécies locais resistentes à submersão (reófitas), seu porte e dinâmica de crescimento vegetativo. Como a zona de oscilação de reservatórios é uma unidade geomorfológica única quanto aos processos atuantes, estas respostas devem ser obtidas por meio da implantação de áreas experimentais *in loco* e consequente monitoramento do desempenho vegetativo do conjunto de espécies utilizadas. Neste sentido devem-se escolher espécies autóctones do local do empreendimento (NEW; XIE, 2008; YANG et al., 2012), dando-se preferência a espécies endêmicas, raras e ameaçadas de extinção. O uso de espécies autóctones é princípio fundamental das soluções baseadas em conceitos e técnicas de Engenharia Natural, valorizando a conservação da biodiversidade e os processos ecológicos inerentes aos locais alvo de intervenção.

O planejamento da reintrodução de espécies vegetais autóctones em ambiente fluvial deve considerar a fitofisionomia de distribuição das espécies ao longo do perfil do talude (DURLO; SUTILI, 2014; NEW; XIE, 2008; NILSSON; SVEDMARK, 2002). Neste sentido importa considerar os diferentes ciclos de vida. Espécies vegetais anuais são capazes de persistir nas margens, apesar das oscilações sazonais do nível da água, pois possuem ciclo de vida curto e, portanto, podem ocupar porções do terreno expostas por curto espaço de tempo (herbáceas, ervas). Já as espécies perenes suportam todo o espectro de oscilação sazonal do nível da água (arbustos e árvores reófitas), ocupando zonas mais altas no talude (KEDDY; REZNICEK, 1986). A Figura 9 ilustra a distribuição das espécies vegetais com diferentes hábitos e ciclos de vida ao longo do talude e o desenvolvimento vegetativo comandado pela dinâmica de oscilação sazonal do nível da água.

Figura 9 - Distribuição das espécies vegetais com diferentes hábitos ao longo do talude e o desenvolvimento vegetativo sazonal comandado pela dinâmica de oscilação do nível da água.



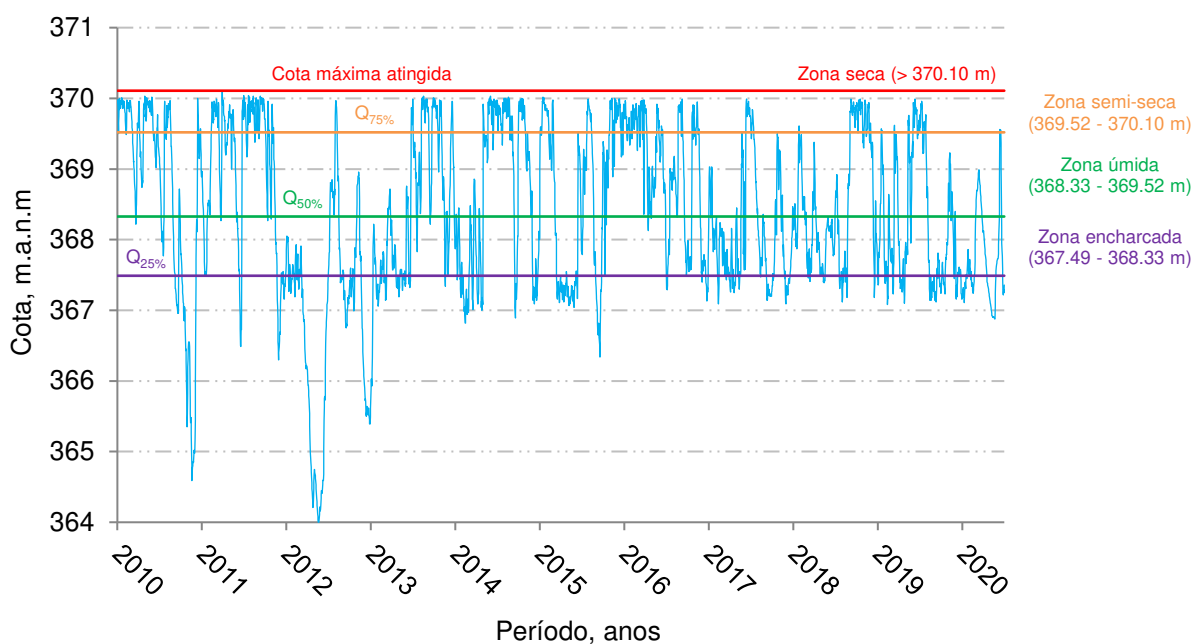
Fonte: Adaptado de FISRWG (1998).

Segundo Naiman & Décamps (1997), as espécies vegetais encontradas nas zonas ripárias podem ser agrupadas em quatro categorias: (1) invasoras – produzem grande quantidade de propágulos disseminados pelo vento e pela água que colonizarão novas zonas aluviais; (2) persistentes – rebrotam após o sistema radicial ou o tronco ser danificado ou enterrado por cheias; (3) resistentes –

resistentes à submersão por semanas durante a estação de crescimento, toleram fogo e pragas; e (4) evitadoras – ausência de adaptações a tipos específicos de perturbações: indivíduos que germinam em ambiente desfavorável e não sobrevivem.

Ali (2003) define quatro zonas de inundação para taludes de reservatórios e as características vegetativas associadas a cada zona (Figura 10).

Figura 10 – Oscilação do nível do reservatório da UHE Itá para o período entre janeiro de 2010 e junho de 2020. As zonas de umidade foram definidas a partir dos quartis ( $Q_{25\%}$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{75\%}$ ) do conjunto de dados.



Fonte: O autor.

Na zona encharcada (frequentemente inundada; 69% do tempo inundada) prevalecem espécies vegetais com sistema radicial superficial com reduzida ramificação lateral, aptas a produzir grandes quantidades de propágulos dispersados pela água. Na zona úmida (periodicamente inundada; 56% do tempo inundada) predominam plantas resistentes a condições severas através de rizomas ou estolões e ramos verticais pouco sujeitos a danos causados por inundações. Nas zonas semi-secas (raramente inundadas; 9% do tempo inundadas) e secas (sem inundação) predominam espécies de porte arbóreo com sistema radicial bem desenvolvido capaz de acessar à água a maiores profundidades.

A tolerância das espécies à inundação diminui conforme aumentam as cotas no terreno (NEW; XIE, 2008), ou seja, as espécies que ocupam zonas mais baixas dentro do reservatório são mais tolerantes e adaptadas à submersão ou possuem ciclo de vida curto, e vice-versa (Figura 9).

Os principais fatores que influenciam a vegetação ripária ao longo de margens de reservatórios são o aumento da duração de inundação, frequência, aumento da magnitude e alteração do período de oscilação (JOHANSSON; NILSSON, 2002), geografia local, padrão de chuva, processos de dispersão, ciclagem de nutrientes, composição e características biotécnicas das espécies locais antes do alagamento (NEW; XIE, 2008). Desta forma, a reintrodução de espécies da zona ripária original requer a consideração da nova dinâmica fluvial. Também devem ser considerados fatores como fertilidade do solo, altas temperaturas e baixa umidade do solo em algumas épocas do ano. Estes fatores geralmente variam em relação ao habitat natural das espécies ripárias que se pretende reintroduzir.

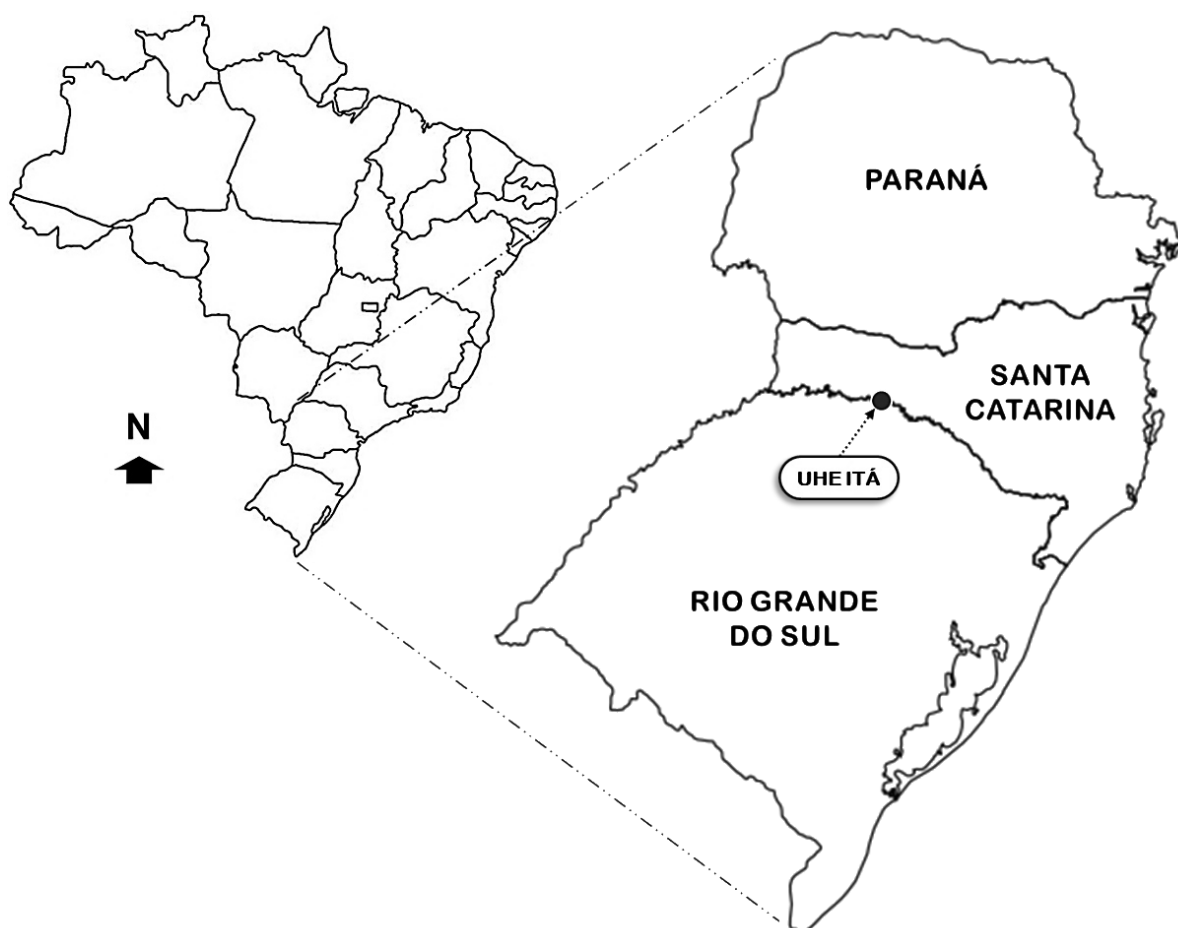


### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo desta pesquisa é o reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá). A usina encontra-se localizada no sul do Brasil, especificamente no trecho nacional do rio Uruguai entre os estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) (Figura 11).

Figura 11 – Localização da Usina Hidrelétrica de Itá (UHE Itá) na região sul do Brasil.



Fonte: DEWES (2019).

A UHE Itá mediante concessão outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é explorada pelo consórcio Itá, que é formado por três empresas, nomeadamente a Engie Brasil Energia, a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e a Companhia de Cimento Itambé. A Engie Brasil Energia é a operadora da usina.

O barramento principal do empreendimento está localizado próximo da curva do rio denominada de Volta do Uvá entre os municípios de Itá (SC) e Aratiba (RS), nas coordenadas geográficas 27°16'39"S e 52°22'59"O. O reservatório da usina possui 141 km<sup>2</sup> de área superficial e 760 km de perímetro quando o nível se encontra na cota máxima. 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. O nível máximo normal de operação do reservatório situa-se a 370 m acima do nível do mar. A amplitude de oscilação do nível da água é de aproximadamente 6 m, com nível mínimo de operação situado a 364 m acima do nível do mar (DEWES, 2019).

A UHE Itá possui capacidade de geração instalada de 1450 MW. Esta capacidade de produção equivalia ao abastecimento de 61% da demanda do estado de Santa Catarina e 31% do estado do Rio Grande do Sul em 2006 (PAIM; ORTIZ, 2006). Os municípios abrangidos pelo reservatório 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 do reservatório 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).

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 (DEWES, 2019). Desta forma, a montante da UHE Itá encontram-se outras usinas em operação como a UHE Machadinho (rio Uruguai), UHE Barra Grande (rio Pelotas), UHE Campos Novos, UHE Garibaldi e UHE São Roque (rio Canoas). A jusante da UHE Itá está localizada a UHE Foz de Chapecó (PAIM; ORTIZ, 2006), como representado na Figura 12.

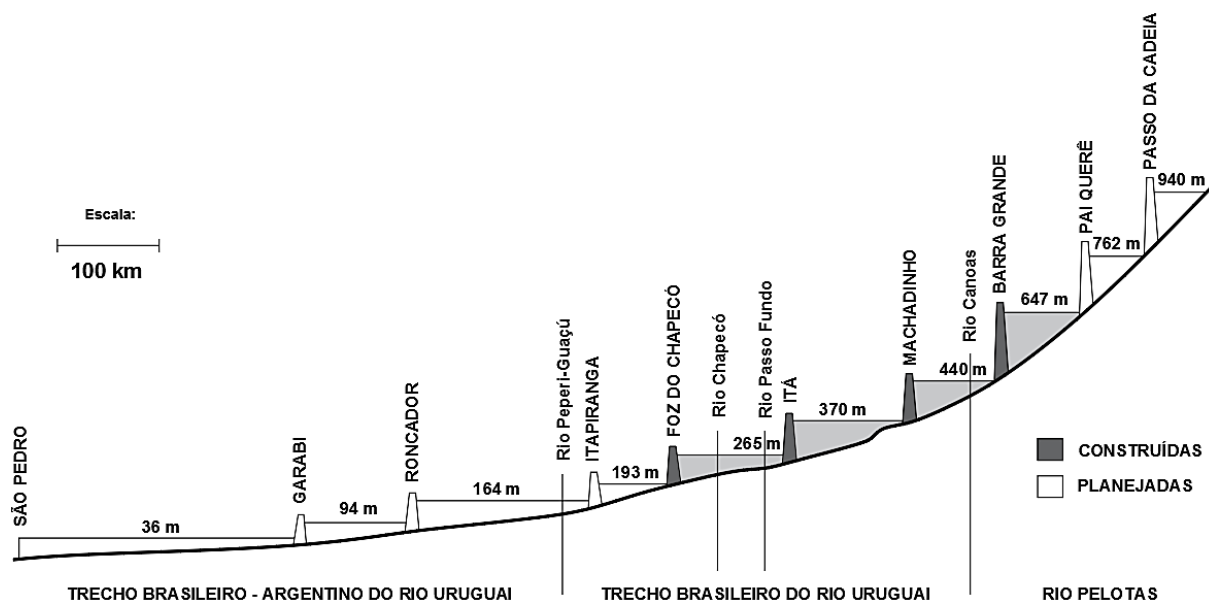
Além destas usinas, outras como Pai Querê, Passo da Cadeia, Itapiranga, Roncador, Garabi e São Pedro têm sua execução planejada (ELETROBRAS, 2017).

O trecho do rio Uruguai abrangido pela UHE Itá apresenta grande tortuosidade, resultado das escavações do fluxo ao longo das zonas de fraquezas do maciço basáltico (CNEC, 1988a). Estas condições resultaram na formação de vales profundos, encaixados e de vertentes com inclinações consideráveis. A Figura 13 apresenta o perímetro e a conformação do reservatório em estudo. Além disso,



está representada a localização dos trechos de intervenção e as seções de monitoramento estudadas, conforme será apresentado posteriormente.

Figura 12 – Perfil longitudinal do rio Uruguai e localização da UHE Itá.



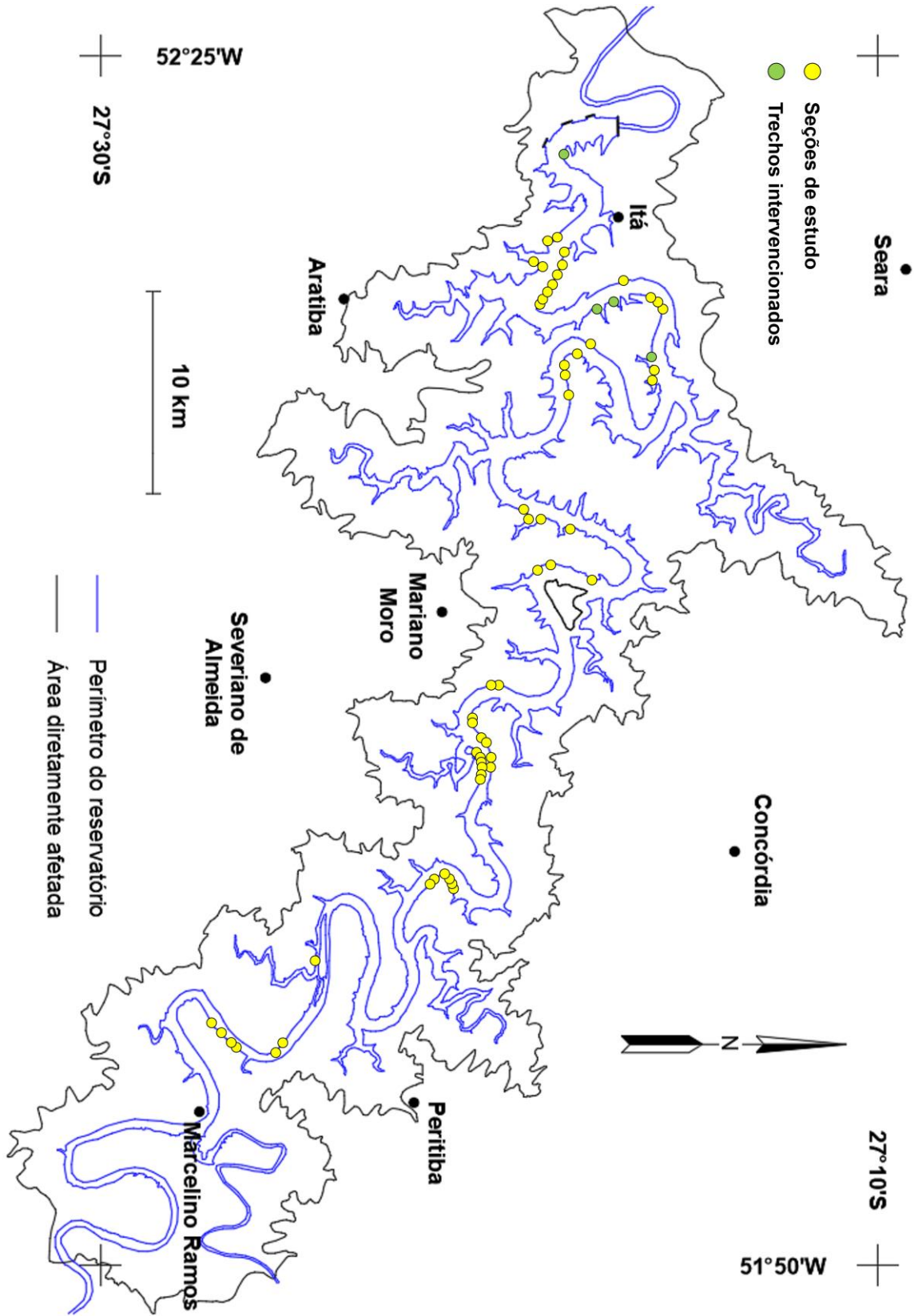
Fonte: Adaptado de PAIM; ORTIZ (2006).

A análise de estabilidade das encostas realizada durante os estudos de viabilidade do empreendimento mostrou que a espessura do solo ao longo do reservatório é reduzida, variando geralmente até no máximo 10 m de profundidade, embora possa atingir até 15 m (CNEC, 1988). Os fatores de segurança obtidos para diferentes pontos no 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 ( $\alpha > 20^\circ$ ). Os solos comumente encontrados são de constituição argilosa de baixa permeabilidade, que apresentam com frequência blocos de rocha imersos no perfil morfológico.

O levantamento semidetalhado identificou os seguintes solos (CNEC, 1988):

- Latossolo Bruno para Latossolo Roxo, horizonte A moderado, textura muito argilosa em relevo suave ondulado;
- Nitossolo Bruno para Nitossolo Vermelho, horizonte A moderado, textura muito argilosa, ocorrência em relevo suave a fortemente ondulado, presença de fase pedregosa;

Figura 13 – Perímetro e conformação do reservatório da UHE Itá.



Fonte: Adaptado de CNEC (1988b).

- Cambissolo distrófico e eutrófico, argila de atividade baixa, horizonte A moderado, textura muito argilosa em relevo suave ondulado e ondulado;
- Cambissolo eutrófico, argila de atividade baixa até alta, horizonte A chernozênico e moderado, textura argilosa a muito argilosa, pode conter fase pedregosa em relevo suave ondulado até fortemente ondulado; e
- Cambissolo eutrófico e distrófico, argila de atividade baixa e alta, horizonte A chernozênico e moderado, textura argilosa a muito argilosa, fase pedregosa e cascalhenta em relevo forte ondulado ou montanhoso.

Findada a apresentação geral do objeto de estudo, serão descritos na sequência os materiais e métodos para o estudo dos processos erosivos verificados na ZONOR, bem como algumas medidas tratativas implementadas para o controle dos mesmos.

## 3.2 MODELAGEM DE PROCESSOS EROSIVOS

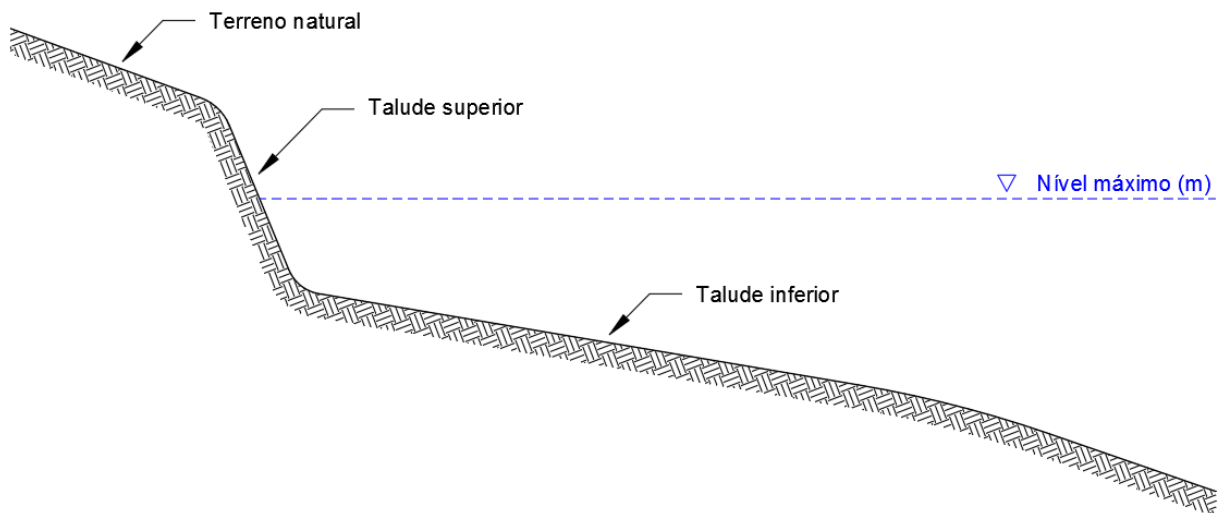
### 3.2.1 Oscilação do nível de operação do reservatório

A série histórica das cotas do nível de operação do reservatório foi fornecida pelo setor de operação e produção de energia elétrica da empresa operadora da usina. A análise concentrou-se nas cotas históricas verificadas a partir da plena operação do empreendimento (janeiro de 2001) até o final do período de monitoramento de erosões (agosto de 2021), de modo a identificar padrões de oscilação e comportamento histórico do nível de operação do reservatório. Também foram analisadas as cotas de oscilação entre o período de janeiro de 2018 e agosto de 2021, entre a primeira e a quarta campanha de monitoramento, respectivamente.

### 3.2.2 Caracterização dos pontos de estudo

A nomenclatura adotada neste documento para identificação dos segmentos dos taludes das margens do reservatório é a definida por Dewes (2019), conforme Figura 14.

Figura 14 – Nomenclatura de identificação dos segmentos morfológicos de margens de reservatórios.



Fonte: Adaptado de DEWES (2019).

Em uma primeira fase, o estudo prévio geral do comportamento dos processos erosivos foi realizado em nível de reservatório. Em uma segunda fase buscou-se dar maior enfoque e detalhamento no estudo de 55 pontos de monitoramento distribuídos por todo o reservatório e em diferentes fisionomias de margens. A análise mais aprofundada na segunda fase visa identificar as variáveis que apresentam relação com o quantitativo de perda de solo a nível local, bem como os padrões fenomenológicos existentes.

Os 55 pontos estudados encontram-se distribuídos em porções iniciais, intermediárias e finais do reservatório e foram escolhidos considerando características do solo, geometria dos taludes, volumes de solo erodido e depositado, largura do espelho de água, orientação em relação à margem e ausência e presença de blocos de rocha (diversas densidades e dimensões) no talude inferior. A escolha de pontos com características distintas foi realizada de forma intencional, de modo a representar as diferentes fisionomias encontradas nos taludes em monitoramento.

A Figura 15 apresenta a conformação geral de alguns trechos representativos das fisionomias de margens consideradas no estudo.

Figura 15 – Conformação geral e características representativas dos pontos de monitoramento em estudo no reservatório da UHE Itá.



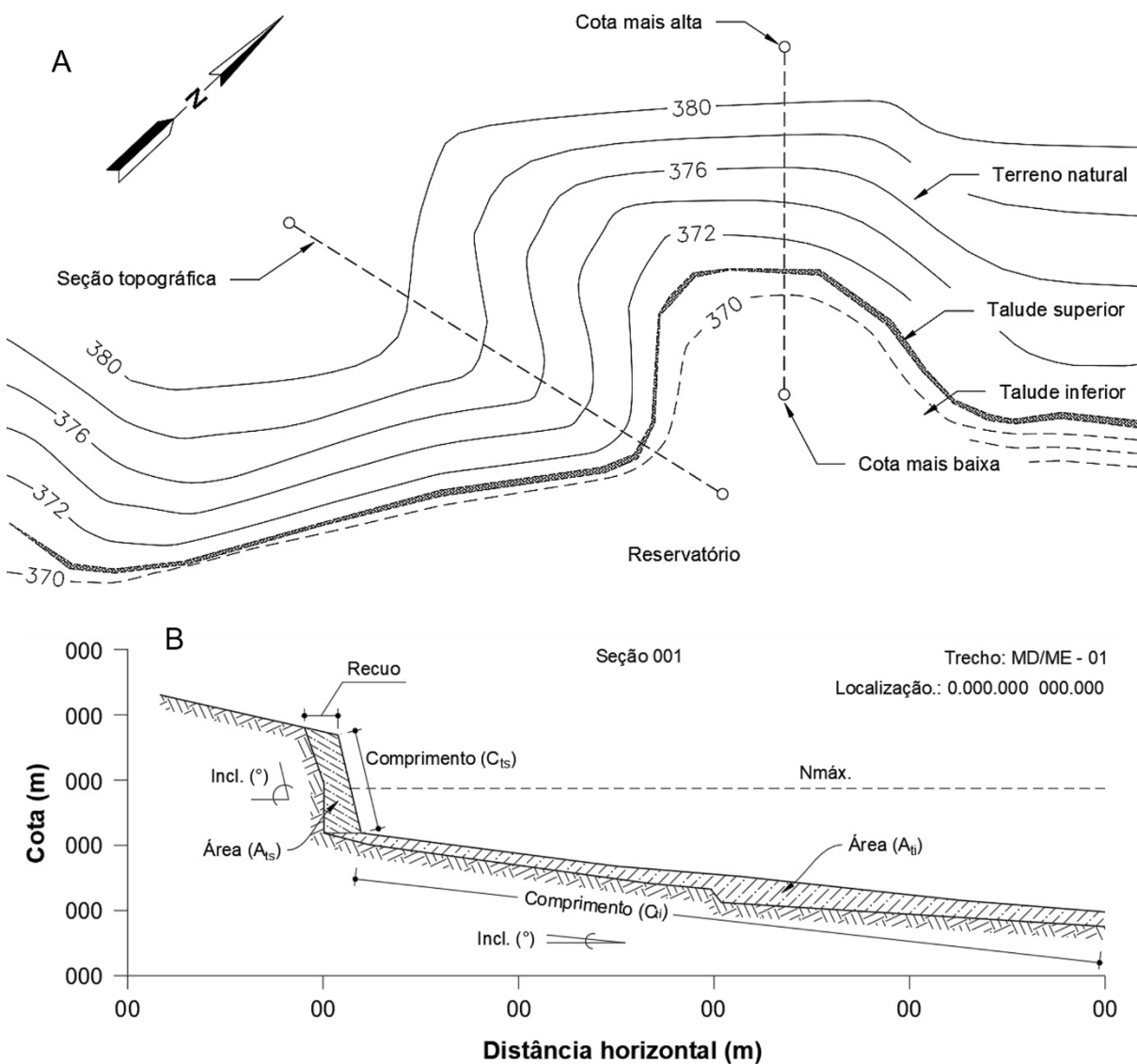
Fonte: O autor.

### 3.2.3 Obtenção de dados quantitativos de erosão

O monitoramento quantitativo dos processos erosivos foi realizado por meio de seções topográficas, conforme metodologia descrita por Dewes (2019). O programa de monitoramento implantado em janeiro de 2018 no reservatório da UHE Itá consiste em 150 pontos de monitoramento distribuídos ao longo da margem direita e margem esquerda, bem como em porções iniciais, intermediárias e finais do reservatório. A metodologia consiste no levantamento topográfico anual detalhado do terreno natural, talude superior e talude inferior de cada ponto monitorado utilizando sistema GPS RTK e estação total. Os perfis topográficos obtidos para cada ponto nas campanhas de monitoramento são acoplados graficamente e disponibilizados em formato editável em *software* de desenho assistido por computador. A partir dos perfis acoplados é possível acompanhar a evolução das

margens e extrair diversas variáveis quantitativas como inclinação e altura dos taludes, recuo e aprofundamento da margem, área transversal de solo erodido e depositado, entre outros. A Figura 16 ilustra o procedimento de instalação das seções topográficas e dois perfis topográficos hipotéticos oriundos de duas campanhas consecutivas de monitoramento.

Figura 16 – A – Procedimento de instalação das seções topográficas a campo englobando o terreno natural, talude superior e talude inferior. As seções topográficas são instaladas perpendicularmente em relação às curvas de nível do terreno; e B – Dois perfis topográficos hipotéticos resultantes de campanhas consecutivas de monitoramento para obtenção de variáveis quantitativas.



Fonte: Adaptado de DEWES (2019).

A instalação das 150 seções topográficas e a primeira campanha de monitoramento foram realizadas em janeiro de 2018. A segunda campanha ocorreu

em abril de 2019, a terceira em maio de 2020 e a quarta em agosto de 2021. A análise quantitativa de processos erosivos apresentada neste documento considera o período compreendido entre a primeira e a quarta campanha de monitoramento, totalizando 43 meses.

Considerando os objetivos desta pesquisa, das 150 seções do programa de monitoramento da UHE Itá apenas 55 seções foram consideradas nas análises. Isto se deve devido à impossibilidade de uso de todas as seções considerando o horizonte de monitoramento de 43 meses, uma vez que em alguns dos trechos monitorados foram executadas obras de controle de erosões. Além disso, muitas das seções monitoradas estavam localizadas no final do reservatório, onde o mesmo tende a apresentar dinâmica maioritariamente fluvial ao invés de lacustre. Outros motivos pela impossibilidade de uso de todas as seções são falhas de levantamento e/ou insegurança na qualidade dos dados.

### **3.2.4 Padrões gerais das erosões para diferentes fisionomias**

A análise inicial e geral dos processos geomorfológicos que ocorrem nas margens com diferentes fisionomias consistiu no desenvolvimento de um modelo matemático e um ábaco.

O modelo matemático permite determinar a faixa de terreno dentro da ZONOR em que ocorrem processos erosivos significativos. Nesta análise não houve diferenciação entre quantitativo de solo erodido e depositado ao longo do talude. No desenvolvimento do modelo foi fixada como variável independente a inclinação média do talude inferior ( $^{\circ}$ ) e como variável dependente o comprimento (m) do talude tomado desde a crista do talude superior em direção ao interior do reservatório (cotas mais baixas). Este comprimento representa no campo uma faixa/largura de terreno ao longo da margem em que significativos processos geomorfológicos ocorrem.

O modelo foi desenvolvido considerando as 55 seções topográficas de monitoramento distribuídas no reservatório (item 3.2.2). As variáveis do modelo foram obtidas em *software* de desenho assistido por computador a partir do gráfico de cada seção contendo os perfis topográficos da primeira e quarta campanha de monitoramento (Figura 16B). A variável comprimento foi mensurada até às zonas

mais baixas no talude inferior em que os perfis topográficos das duas campanhas de monitoramento se sobrepunham permanentemente ou apresentavam trajetória aproximadamente paralela e distanciados inexpressivamente comparado às cotas superiores no talude.

Já o ábaco permite identificar e classificar graficamente as diferentes fisionomias dos taludes em monitoramento no reservatório da UHE Itá, nomeadamente taludes sem presença de blocos de rocha, taludes com presença de blocos esparsos e taludes densamente recobertos por blocos na superfície, bem como taludes localizados em baías.

O ábaco foi desenvolvido fixando-se como variável independente a inclinação média no talude inferior ( $^{\circ}$ ) e como variável dependente a espessura média da camada de solo mobilizada (cm) no talude inferior. O termo “camada de solo mobilizada” considera a soma da área transversal de solo erodido e depositado entre os perfis topográficos da primeira e quarta campanha de monitoramento.

A espessura média de solo mobilizado no talude inferior foi determinada para a faixa de terreno compreendida entre intervalos de 1 m de cota, portanto, não considerando o talude inferior como um todo. Por este motivo, na maioria das seções de monitoramento pode-se extrair dois conjuntos de dados. A inclinação correspondente foi obtida considerando o segmento do talude compreendido no intervalo de cota de 1 m. A espessura da camada de solo foi determinada pela seguinte equação:

$$e = 100 \cdot \frac{\sum A_e + \sum A_d}{C_s} \quad (3)$$

em que:  $e$  é a espessura média da camada de solo mobilizada (cm);  $\sum A_e$  é a soma da área transversal de solo erodido ( $m^2$ );  $\sum A_d$  é a soma da área transversal de solo depositado ( $m^2$ ); e  $C_s$  é o comprimento do segmento de talude inferior considerado (m).

No total foram obtidos 111 pares de dados para elaboração do ábaco (inclinação x espessura). As variáveis foram obtidas em *software* de desenho assistido por computador a partir do gráfico de cada seção de monitoramento contendo os perfis topográficos da primeira e quarta campanha de monitoramento (Figura 16B).



Os dados, tanto do modelo matemático quanto do ábaco, foram processados no pacote *Office Microsoft Excel*.

### 3.2.5 Análise detalhada das erosões para diferentes fisionomias

#### 3.2.5.1 Caracterização física dos solos

Após definição dos 55 pontos de estudo, os solos desses locais foram caracterizados fisicamente em laboratório. Para tal foram realizadas coletas de amostras deformadas e indeformadas de solo a campo. As amostras foram coletadas em apenas um ponto em cada seção de monitoramento, especificamente na transição entre o talude superior e o talude inferior a aproximadamente 10 cm abaixo da superfície. O ponto de coleta das amostras foi considerado representativo da seção como um todo. Os ensaios posteriormente realizados em laboratório seguindo as respectivas normas foram os seguintes:

- ✓ Umidade natural ( $w$ ) (%) – NBR 6457/86

$$w = \left( \frac{W_w}{W_s} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

- ✓ Peso específico aparente natural ( $\gamma_{\text{nat}}$ ) (kN/m<sup>3</sup>) – NBR 9813/2016

$$\gamma_{\text{nat}} = \frac{W}{V} \quad (5)$$

- ✓ Peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) (kN/m<sup>3</sup>) - (GEE; BAUDER, 1986)

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (6)$$

- ✓ Textura (areia, silte e argila) – Método da pipeta - EMBRAPA, 1997.

Através de fórmulas de correlação foram determinados também os seguintes índices físicos:

- ✓ Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) (kN/m<sup>3</sup>)

$$\gamma_d = \frac{\gamma_{nat}}{(1 + w)} \quad (7)$$

- ✓ Índice de vazios (e)

$$e = \left( \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (8)$$

- ✓ Porosidade ( $\eta$ ) (%)

$$\eta = \frac{e}{(1 + e)} \cdot 100 \quad (9)$$

- ✓ Grau de saturação (S) (%)

$$S = \left( \frac{w \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} \right) \quad (10)$$

- ✓ Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ) (kN/m<sup>3</sup>)

$$\gamma_{sat} = (1 - \eta) \cdot \gamma_s + \eta \cdot \gamma_w \quad (11)$$

- ✓ Peso específico submerso ( $\gamma_{sub}$ ) (kN/m<sup>3</sup>)

$$\gamma_{sub} = (\gamma_s - \gamma_w) \cdot (1 - \eta) \quad (12)$$

em que:  $W$  é o peso total da amostra (g);  $V$  é o volume total da amostra (cm<sup>3</sup>);  $W_w$  é o peso da água (g);  $W_s$  é o peso dos sólidos (g);  $V_s$  é o volume de sólidos (cm<sup>3</sup>) e  $\gamma_w$  é o peso específico da água (kN/m<sup>3</sup>).

As amostras deformadas e indeformadas para os ensaios de caracterização foram preparadas segundo os critérios da norma NBR 6457/86 e NBR 9604/86, respectivamente. Os ensaios de laboratório foram conduzidos na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), nomeadamente no Laboratório de Física do Solo (LFS) – Centro de Ciências Rurais (CCR) e Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) - Centro de Ciências Rurais (CCR).

#### *3.2.5.2 Direção e velocidade do vento*

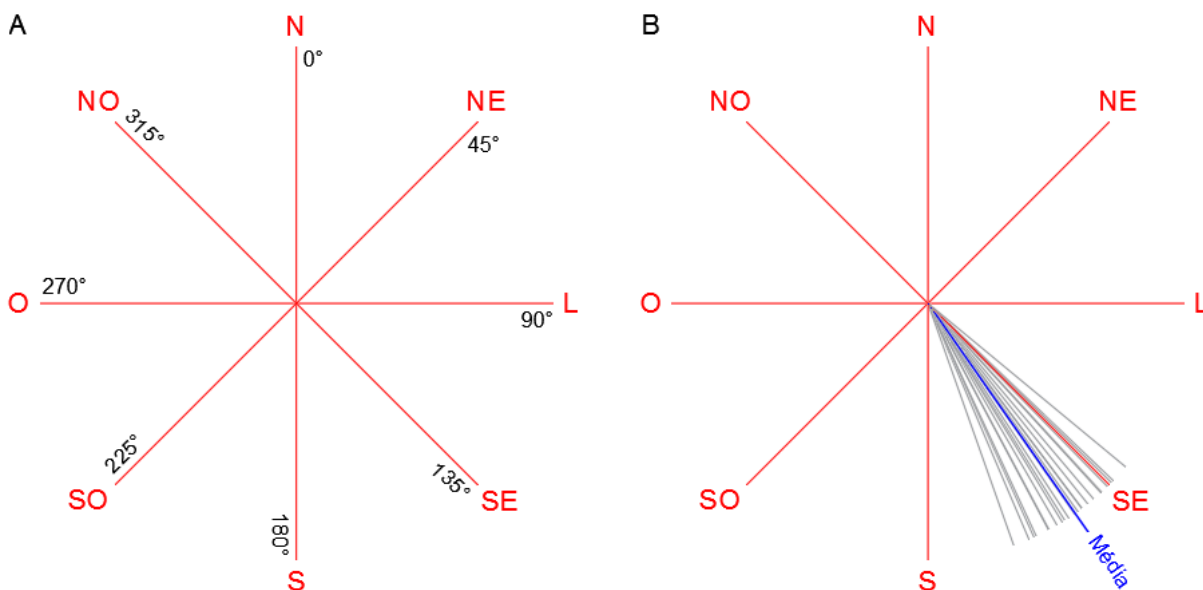
Os dados de direção e velocidade do vento para a região da UHE Itá foram obtidos da estação meteorológica Cetredia, localizada no município de Concórdia (SC) e operada pelo Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/CIRAM). A estação está localizada em um ponto médio e representativo da extensão do reservatório nas coordenadas - 27,21 (graus, dec) latitude e -52,15 (graus, dec) longitude.

Os dados obtidos e analisados compreendem o período a partir de julho de 2018 (início da operação da estação) até agosto de 2021.

#### *3.2.5.3 Fetch*

O *fetch* é a maior distância ininterrupta sobre a superfície da água sobre a qual o vento sopra produzindo ondas. O *fetch* para cada ponto monitorado foi definido a partir das direções médias mensais do vento entre julho de 2018 (início da operação da estação) e agosto de 2021 (quarta campanha de monitoramento). A direção média mensal neste período variou desde 128° até 171°, resultando numa amplitude de 43°. Devido à pequena amplitude de variação dos dados, adotou-se a direção média de 146° (linha azul) resultante da média aritmética das direções médias mensais, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 – A – Direções do vento (graus) para oito direções diferentes; e B – Direções médias mensais do vento entre julho de 2018 e maio de 2020 (linhas cinzas) registradas na estação meteorológica Cetredia, Concórdia (SC) e média das direções mensais do vento (linha azul) adotada para a determinação do *fetch* em cada ponto monitorado.



Fonte: O autor.

O *fetch* em cada ponto monitorado foi calculado delimitando-se uma linha central orientada na direção média predominante do vento determinada anteriormente (146°), estendendo-se desde o ponto em estudo até a primeira interceptação com o perímetro do reservatório. A partir da linha central foram definidas mais sete linhas para ambos os lados com ângulo de 6° entre cada uma delas, formando um arco de 42°. Cada linha foi estendida desde o ponto em estudo até o ponto de interceptação com a margem do reservatório ou obstáculos topográficos, como ilhas, por exemplo.

A partir do comprimento de cada linha ( $L$ , m) e do cosseno do ângulo associado calculou-se a média ponderada dos comprimentos, resultando no *fetch* efetivo ( $F_E$ ). O cálculo foi realizado conforme equação a seguir:

$$F_E = \frac{\sum(L \cdot \cos \alpha)}{\sum \cos \alpha} \quad (13)$$

em que:  $F_E$  é o *fetch* efetivo (m);  $L$  é o comprimento de cada segmento de linha (m) e  $\alpha$  é o ângulo formado entre a linha central e o segmento de linha considerado (°). Os

procedimentos para definição e cálculo do *fetch* efetivo seguiram a metodologia apresentada em NRCS (2014).

#### 3.2.5.4 Variáveis quantitativas das seções topográficas

Os dados referentes à geometria dos taludes e área de solo erodido e depositado no talude superior e inferior em cada ponto estudado foram mensurados em *software* de desenho assistido por computador. Os dados obtidos equivalem ao período compreendido entre janeiro de 2018 e agosto de 2021, entre a primeira e a quarta campanha de monitoramento, respectivamente.

As variáveis obtidas para o talude superior (TS) e talude inferior (TI) foram área transversal de solo erodido e depositado (m<sup>2</sup>), inclinação média do talude (°), comprimento e altura do talude (m). No terreno natural foi obtida a inclinação média da encosta (°) e o recuo da crista (cm). O comprimento do talude superior foi tomado entre a sua base e crista. No talude inferior, as variáveis foram tomadas desde a cota 367,1 m até a base do talude superior para todas as seções analisadas. A cota 367,1 m foi definida de tal forma que os critérios de obtenção de dados em todas as seções fossem os mesmos. A Figura 16B exemplifica esquematicamente a obtenção das variáveis elencadas acima.

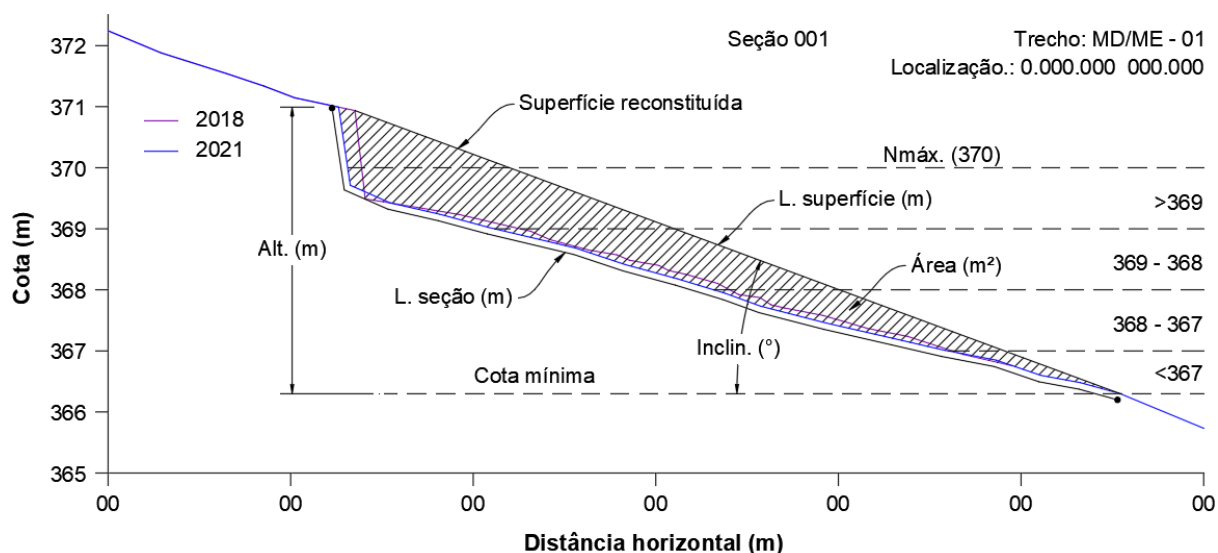
Também foram realizadas análises de erosões e deposições de solo nas seções compartimentando as seções topográficas em intervalos de cotas, nomeadamente >369,0 m; 369,0 – 368,0 m e 368,0 – 367,0 m. Os parâmetros geométricos dos taludes citados acima foram obtidos, neste estudo, nos intervalos de cotas analisadas.

Para as seções topográficas instaladas em margens com presença de blocos de rocha, estes foram mensurados sobre o alinhamento da seção topográfica desde a base do talude superior até a cota mínima de levantamento topográfico dentro do reservatório. Todos os blocos de rocha sobre a seção topográfica foram avaliados quanto ao seu diâmetro e percentagem de cobertura do talude. A percentagem de cobertura foi determinada utilizando o gabarito metálico representado na Figura 25.

Por fim, realizou-se a recomposição aproximada da feição original do relevo (antes do enchimento do reservatório) nas seções topográficas para análise do volume histórico acumulado de solo erodido desde o início da operação do

reservatório até o final do monitoramento topográfico (agosto de 2021). O objetivo desta análise foi determinar o volume erodido e a taxa erosiva média nas seções até 2018, comparando estes dados com as taxas erosivas observadas entre 2018 e 2021 (primeira e quarta campanha de monitoramento, respectivamente) e com a oscilação histórica do nível da água, a fim de detectar alterações na fenomenologia erosiva nas margens provocadas pela operação do reservatório. Os parâmetros geométricos dos taludes e variáveis quantitativas relacionadas aos processos erosivos foram obtidos conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Exemplo de seção topográfica real com perfil original reconstituído e variáveis obtidas para análise dos processos erosivos acumulados.



Fonte: O autor.

O processamento dos dados das análises descritas acima foi realizado com auxílio do pacote *Office Microsoft Excel*.

### 3.3 EFICÁCIA TÉCNICA DAS INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA NATURAL

#### 3.3.1 Caracterização dos trechos de intervenção

Os taludes superiores e inferiores do reservatório da UHE Itá, de forma geral, são desprovidos de qualquer tipo de cobertura vegetal. Em casos de baixa declividade do talude inferior, por vezes as espécies herbáceas e arbustivas conseguem colonizar de forma espontânea algumas porções do talude, no entanto

de modo pontual e pouco efetivo. Esta colonização costuma ocorrer em zonas menos suscetíveis às ondas como em baías ou braços do reservatório. A inexistência de vegetação nos taludes da Zonor é ocasionada pela oscilação sazonal do nível de operação do reservatório e pelo efeito erosivo das ondas. De modo geral, estes efeitos são recorrentes em reservatórios deste tipo.

Embora o nível do reservatório permaneça poucos dias do ano na sua cota máxima (370,0 m.a.n.m.), o efeito de inundação temporária impede a colonização espontânea e definitiva dos taludes por vegetação herbácea e arbustiva. Um dos motivos é a incapacidade de muitas espécies vegetais em tolerar a inundação total, mesmo que temporária, pela ausência de características adaptativas favoráveis à sobrevivência neste tipo de ambiente.

No entanto, outro agravante está relacionado ao efeito da ação constante das ondas sobre os taludes. O efeito de solapamento e a remoção de solo pelas ondas atua ao longo de todo o talude inferior à medida que a oscilação do nível do reservatório varia entre cotas. Com as constantes subidas e descidas do nível, cuja velocidade e amplitude são típicas de cada reservatório, as ondas desestruturam e movimentam o solo das cotas mais altas para as cotas mais baixas e para dentro do reservatório, prejudicando o enraizamento e desenvolvimento da vegetação nas porções solicitadas do talude.

Cientes desta problemática em grandes reservatórios de água, somada à inviabilidade econômica em controlar estes tipos de processos erosivos em larga escala utilizando técnicas tradicionais de engenharia, foram propostos projetos pilotos baseados em técnicas de Engenharia Natural para controle dos fenômenos descritos. As técnicas de Engenharia Natural justificam-se especialmente devido ao seu menor custo executivo, além dos benefícios técnicos, biológicos e estético-paisagísticos proporcionados ao local intervencionado.

Desta forma, foram selecionados quatro trechos experimentais com processos erosivos ativos para implantação de técnicas de Engenharia Natural. O panorama de uma parte dos trechos intervencionados é apresentado na Figura 19.

Os trechos ME 05 e MD 01 possuem comprimento total de 380 m e 680 m, respectivamente, totalizando 1060 m intervencionados. O trecho ME 05 é caracterizado pela ausência de blocos de rocha e por apresentar taludes com alturas e inclinações menores que o trecho MD 01. Os trechos ME 05 e MD 01 foram

divididos em 6 e 3 subtrechos, respectivamente, considerando as características, geometria e orientação das margens. A seguir foram selecionadas as técnicas de intervenção mais adequadas para cada subtrecho tendo em vista suas características e condicionantes.

Figura 19 – Trechos experimentais (ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21) para implantação de projetos piloto utilizando técnicas de Engenharia Natural no reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor.

Os trechos ME 03 e ME 21 possuem comprimento total de 375 m e 660 m, respectivamente, totalizando 1035 m intervencionados. De modo geral, os trechos se caracterizam pela ausência de blocos de rocha nos taludes e por apresentarem solos argilosos. A geometria dos taludes para ambos os trechos é similar. Os trechos ME 03 e ME 21 foram divididos em 5 e 7 subtrechos com intervenção, respectivamente, considerando as características, geometria e orientação das margens. Do total de subtrechos definidos, apenas as técnicas implantadas em 2 e 4 subtrechos dos trechos ME 03 e ME 21 foram avaliados, respectivamente.



A distribuição das técnicas monitoradas nos respectivos subtrechos de cada trecho pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição das técnicas de Engenharia Natural monitoradas por trecho e subtrecho.

Técnicas de intervenção	ME 05 - Subtrechos					
	1	2	3	4	6	7
Biorretentor de coco vegetado						
Siltação viva						
Feixes vivos transversais						
Plantio de espécies arbustivas em linhas						
Plantio de espécies arbustivas em quadrícula						
Feixes vivos longitudinais e siltação viva						
Biorretentor de coco vegetado contínuo						
Plantio de espécies herbáceas						
Técnicas de intervenção	MD 01 - Subtrechos					
	1	2	3			
Biorretentor de coco vegetado						
Enrocamento vivo						
Plantio de espécies arbustivas						
Plantio de espécies herbáceas						
Técnicas de intervenção	ME 03 - Subtrechos					
	5*	6**				
Paliçada tripla vegetada						
Paliçada dupla vegetada						
Paliçada simples vegetada						
Plantio de espécies herbáceas						
Técnicas de intervenção	ME 21 - Subtrechos					
	1	4	6	7		
Paliçada simples						
Plantio de espécies arbustivas (esconso)						
Biorretentor de coco vegetado						
Parede de prumo frontal vegetada						
Paliçada dupla						
Plantio de espécies arbustivas em quadrícula						
Plantio de espécies arbustivas em área						
Plantio de espécies herbáceas						

\* Plantio em linha

\* Plantio em área

Fonte: O autor.

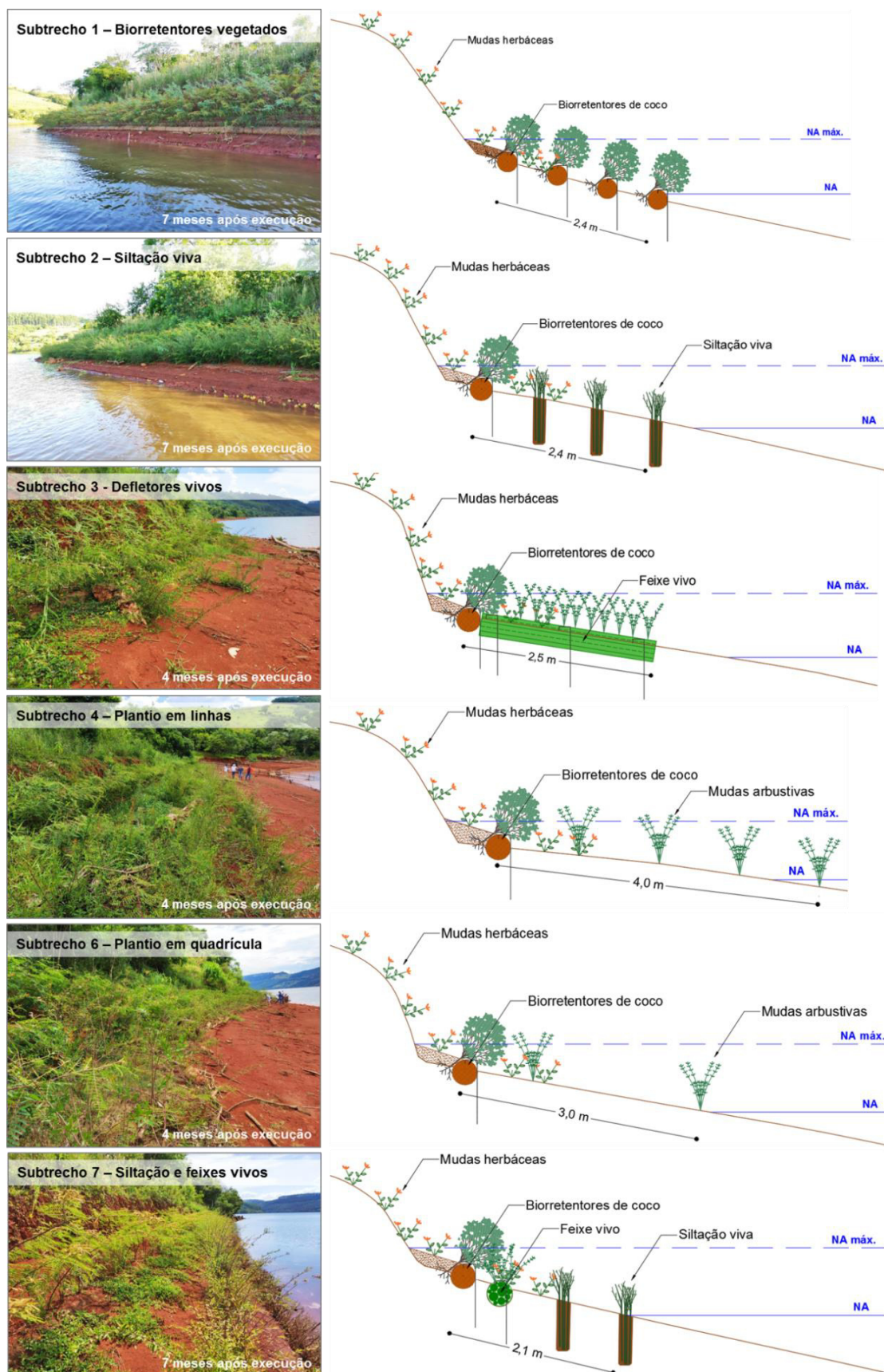
No **subtrecho 1** do trecho ME 05 foram executadas três linhas de biorretentores de coco com diâmetro de 0,30 m, dispostos num sulco previamente aberto e fixados ao solo com pilotos de aço com comprimento de 1,0 m, combinados com o plantio de mudas arbustivas numa densidade de 15 un./m. No **subtrecho 2** foram executadas três linhas de siltação, sendo que a linha mais próxima à água

consistiu na colocação de mudas arbustivas inteiras no interior de um sulco com profundidade de 0,60 m e largura de 0,20 m. As outras duas linhas foram executadas seguindo o mesmo procedimento, mas utilizando estacas vivas provenientes de material vegetal com capacidade de propagação vegetativa. No **subtrecho 3** foram executados feixes vivos dispostos em um ângulo de 90° em relação à margem e espaçados 2,0 m entre si. Os feixes são constituídos de ramos vivos de espécies com capacidade de propagação vegetativa amarrados em formato cilíndrico com diâmetro de 0,30 m, compactos, utilizando arame galvanizado. Os feixes foram dispostos num sulco previamente aberto no solo e fixados com pilotos de aço com comprimento de 0,80 m. No **subtrecho 4** foi realizado o plantio de quatro linhas de mudas arbustivas numa densidade de 15 un./m. No **subtrecho 6** foram executadas quadrículas constituídas pelo plantio de mudas arbustivas numa densidade de 15 un./m. As quadrículas apresentam dimensões de 1,5 m x 1,5 m e foram executadas com uma orientação de 45° em relação à margem. No **subtrecho 7** foi aplicado um feixe vivo disposto longitudinalmente à margem e duas linhas de siltação. A linha de siltação mais próxima da água foi executada com estacas vivas provenientes de material vegetal com capacidade de propagação vegetativa, enquanto que a outra linha foi executada com mudas arbustivas combinadas com estacas vivas.

Também foi executada uma linha de biorretentor de coco contínuo na base do talude superior combinado com mudas arbustivas, abrangendo todos os subtrechos de intervenção e seguindo todos os procedimentos executivos descritos anteriormente para o subtrecho 1. Além disso, também foi realizado de forma contínua em todos os subtrechos o plantio de mudas herbáceas abrangendo todo o talude superior e uma faixa com largura de 1,0 m no talude inferior, ambos numa densidade de 4 un./m<sup>2</sup>.

O aspecto geral das técnicas implantadas nos subtrechos dos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21 e respectivos perfis executivos pode ser observado na Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23, respectivamente.

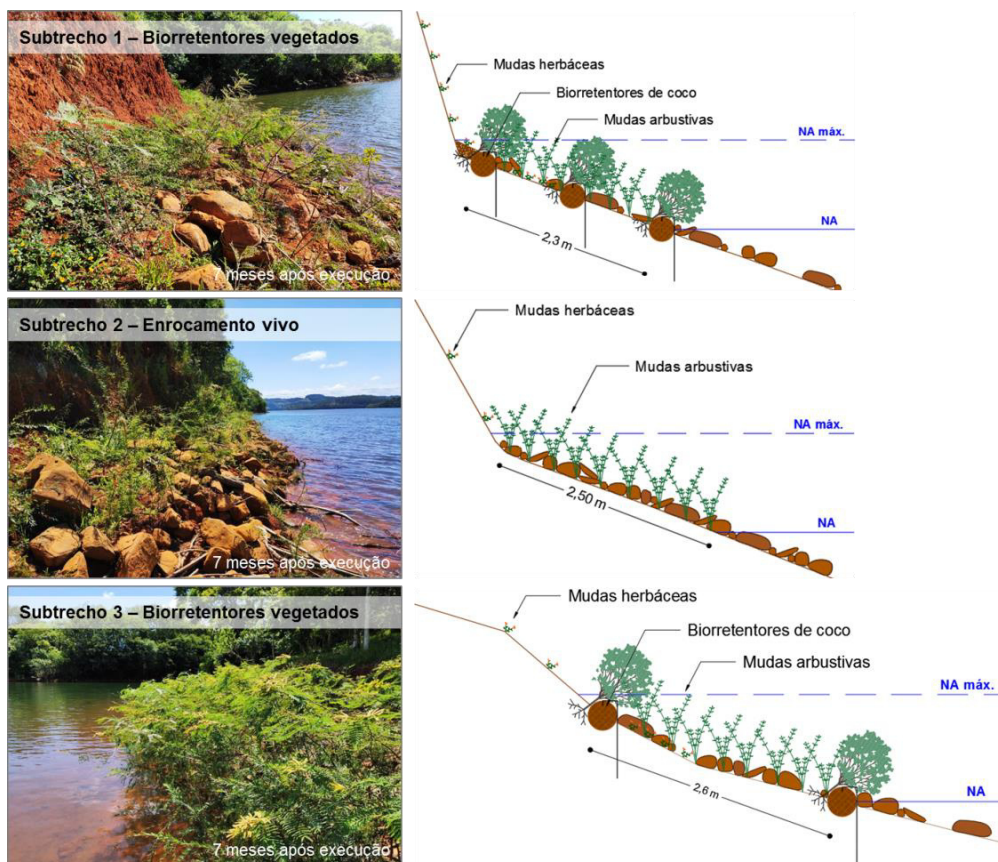
Figura 20 – Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 05 e respectivos perfis executivos.



Fonte: O autor e SOUSA et al. (2019).

No **subtrecho 1** do trecho MD 01 foram executadas três linhas de biorretentores de coco com diâmetro de 0,30 m, dispostos num sulco previamente aberto e fixados ao solo por pilotos de aço com comprimento de 1,0 m, combinados com o plantio de mudas arbustivas numa densidade de 15 un./m. Também foi realizado o plantio de mudas arbustivas (5 un./m<sup>2</sup>) numa faixa com largura de 2,3 m e o plantio de mudas herbáceas (4 un./m<sup>2</sup>) numa faixa com largura de 1,0 m. No **subtrecho 2**, entre as pedras existentes no local, foi realizado apenas o plantio de mudas arbustivas numa densidade de 5 un./m<sup>2</sup>. No **subtrecho 3** foram executadas duas linhas de biorretentores de coco combinados com o plantio de mudas arbustivas, seguindo os mesmos procedimentos descritos no subtrecho 1. Também foi realizado o plantio de mudas arbustivas (5 un./m<sup>2</sup>) numa faixa de 2,6 m e o plantio de mudas herbáceas (4 un./m<sup>2</sup>) numa faixa de 1,0 m. Também foi realizado de forma contínua em todos os subtrechos, o plantio de mudas herbáceas (4 un./m<sup>2</sup>) abrangendo o talude superior.

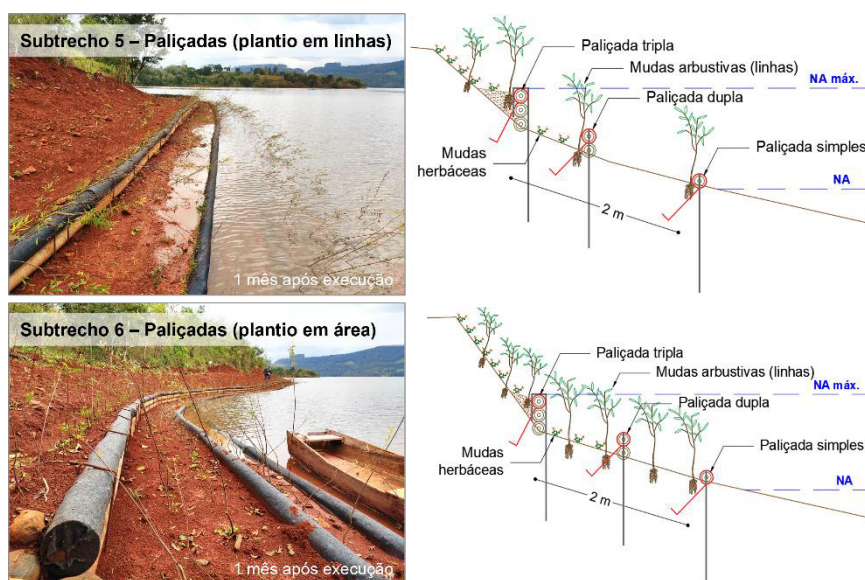
Figura 21 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho MD 01 e respectivos perfis executivos.



Fonte: O autor e SOUSA et al. (2019).

No **subtrecho 5** do trecho ME 03 foram executadas três linhas de paliçadas em madeira, nomeadamente paliçada tripla, dupla e simples. Nas adjacências das paliçadas foram plantadas mudas de espécies arbustivas em linha (15 un./m). Também foram plantadas mudas herbáceas (2 un./m<sup>2</sup>) na porção entre a paliçada dupla e tripla e no terreno natural no tardoz da paliçada tripla. No **subtrecho 6** foram implantadas as mesmas intervenções com os mesmos arranjos construtivos, exceto pelo plantio de mudas arbustivas entre as paliçadas tripla e simples, que foi executado em área. A densidade adotada para este plantio foi de 5 un./m<sup>2</sup>.

Figura 22 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 03 e respectivos perfis executivos.

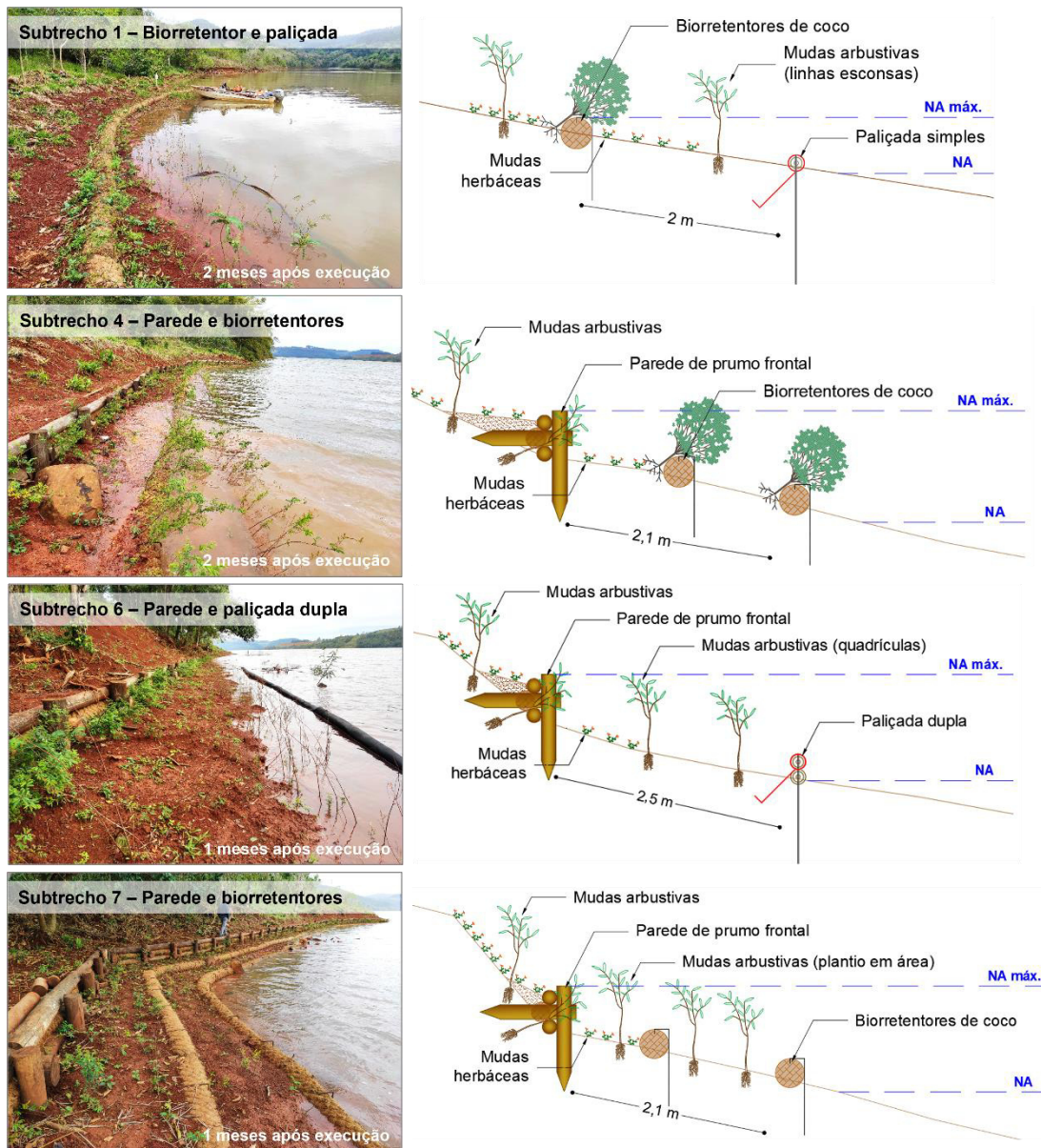


Fonte: O autor e SOUSA et al. (2019).

No **subtrecho 1** do trecho ME 21 foi executada uma linha de biorretentores vegetados (15 un./m) próxima da cota máxima e uma paliçada simples na porção inferior do terreno dentro do reservatório. Entre estas duas estruturas foi realizado o plantio de mudas arbustivas (15 un./m) em linhas esconsas (45°), espaçadas 2,0 m entre si. Ainda foram plantadas mudas herbáceas acima da linha de biorretentor e numa faixa de 1,0 m dentro do reservatório (2 un./m<sup>2</sup>). No **subtrecho 4** foram executados um muro de suporte com prumo frontal vegetado e duas linhas de biorretentores vegetados. A densidade de plantio de mudas arbustivas próximo aos biorretentores e no interior do prumo frontal foi de 15 un./m e 10 un./m,

respectivamente. Também foram plantadas mudas herbáceas acima do muro de prumo frontal e numa faixa de 1,0 m dentro do reservatório ( 2 un./m<sup>2</sup>).

Figura 23 - Aspecto geral das técnicas implantadas no trecho ME 21 e respectivos perfis executivos.



Fonte: O autor e SOUSA et al. (2019).

No **subtrecho 6** foi executado um muro de prumo frontal, como descrito no subtrecho 4, bem como uma paliçada dupla dentro do reservatório. Entre estas duas estruturas foi realizado o plantio em quadrícula de mudas arbustivas (15 un./m), espaçadas 2,0 m entre si e numa inclinação de 45° em relação à margem. Ainda foram plantadas mudas herbáceas acima do muro de prumo frontal e numa faixa de 1,0 m dentro do reservatório (2 un./m<sup>2</sup>). No subtrecho 7 foram executadas as

mesmas estruturas descritas para o subtrecho 4 (muro de prumo frontal e linhas de biorretentores), diferindo apenas no plantio de mudas arbustivas em área (5 un./m<sup>2</sup>) nas adjacências dos biorretentores.

As obras nos trechos ME 05 e MD 01 ocorreram entre abril e agosto de 2019 e nos trechos ME 03 e ME 21 entre maio e junho de 2020. As obras para implantação das técnicas foram executadas por empresas terceirizadas devidamente contratadas pelo Consórcio Itá, nos anos de 2019 e 2020. A elaboração dos projetos, o acompanhamento e o controle da qualidade das obras foram realizados pela equipe consultora do Laboratório de Engenharia Natural (LabEN) no âmbito do convênio existente entre a Engie Brasil Energia e a Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) da UFSM. Os projetistas das intervenções são: Eng. Me. Junior Joel DEWES (LabEN/UFSM), Eng. Dr<sup>a</sup>. Rita dos Santos SOUSA (LabEN/UFSM) e Prof. Dr. Fabrício Jaques SUTILI (LabEN/UFSM). O preposto técnico dos projetos foi o Eng. Cid IONCECK (Engie Brasil Energia).

### **3.3.2 Monitoramento do desempenho das técnicas de intervenção**

A eficácia técnica das intervenções de Engenharia Natural em cada subtrecho foi avaliada considerando os seguintes aspectos:

- ✓ Integridade estrutural das intervenções;
- ✓ Desenvolvimento vegetativo das plantas; e
- ✓ Controle dos processos erosivos.

#### *3.3.2.1 Integridade estrutural das intervenções*

A integridade das estruturas inertes em intervenções em reservatórios é fundamental pois além de contribuir para o controle das erosões, permite suporte físico indispensável ao desenvolvimento das plantas. Dessa forma, a integridade estrutural das intervenções foi avaliada utilizando níveis de pontuações, nomeadamente: (1) destruída; (2) danos severos; (3) danos leves e (4) sem danos. Em cada subtrecho intervencionado foram pontuadas todas as técnicas separadamente (biorretentores, parede, siltação, plantios, etc), obtendo-se no final

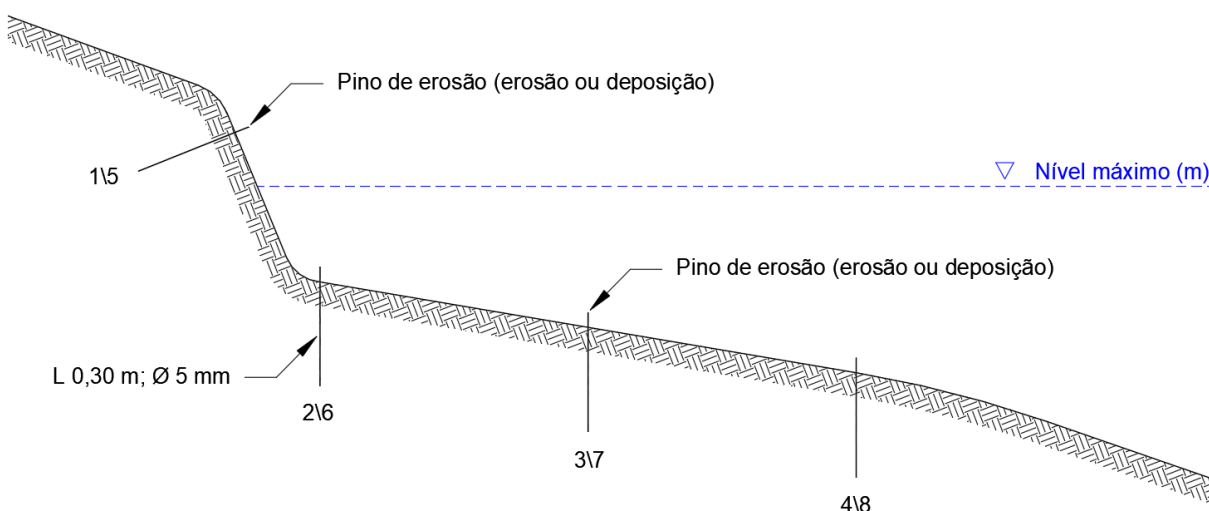
do processo uma pontuação média para o conjunto do subtrecho ou arranjo construtivo implantado no subtrecho. A descrição para classificação das técnicas em cada nível de pontuação pode ser observada no Apêndice A.

### 3.3.2.2 Efeito técnico das intervenções

O efeito técnico das intervenções, nomeadamente proporcionar suporte estrutural às plantas e controlar a erosão na margem, foi avaliado utilizando níveis de pontuações, a saber: (1) desprezível; (2) – insatisfatório; (3) – bom e (4) – muito bom. Em cada subtrecho intervencionado foram pontuadas todas as técnicas separadamente (biorretentores, parede, siltação, plantios, etc), obtendo-se no final do processo uma pontuação média para o conjunto do subtrecho. A descrição para classificação das técnicas nos níveis de pontuação é apresentado no Apêndice A.

A análise da capacidade das técnicas em controlar a erosão junto à margem foi complementada quantitativamente por meio de pinos de erosão. Os 8 pinos utilizados na materialização das parcelas permanentes foram medidos na sua porção exposta em cada levantamento de dados para verificar aprofundamentos (erosão) ou elevações (deposição) na margem intervencionada (Figura 24).

Figura 24 – Desenho esquemático do procedimento de instalação de pinos de erosão.



Fonte: O autor.



### 3.3.2.3 Desenvolvimento vegetativo das plantas

As espécies utilizadas em projeto apresentam porte arbustivo e herbáceo. As espécies arbustivas utilizadas são: *Calliandra brevipes* Benth. (Angiquinho); *Gymnanthes schottiana* Müll. Arg. (Sarandi-vermelho); *Mimosa pigra* L. (Malícia-de-boi); *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. Arg. (Sarandi-branco) e *Sesbania virgata* (Cav.) Pers. (Cambaí-amarelo). As espécies herbáceas compreendem: *Arachis repens* Handro (Amendoim-forrageiro) e *Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski (Mal-me-quer). As espécies *C. brevipes*, *G. schottiana*, *M. pigra* e *S. virgata* foram produzidas majoritariamente via seminal, exceto a espécie *P. sellowianus* que foi produzida apenas por estaquia. As espécies *A. repens* e *S. trilobata* foram propagadas por estolões. Os materiais de propagação foram obtidos de matrizes cadastradas e georreferenciadas pela equipe do Horto Botânico da UHE Itá. Toda a produção de mudas foi realizada no mesmo horto.

O desenvolvimento vegetativo foi avaliado visualmente utilizando níveis de pontuações, nomeadamente: (1) sem desenvolvimento; (2) baixo desenvolvimento; (3) bom desenvolvimento e (4) desenvolvimento vigoroso. Em cada subtrecho intervencionado, o desenvolvimento vegetativo foi pontuado para todas as técnicas separadamente (biorretentores, parede, siltação, plantios, etc), bem como para os plantios de espécies arbustivas e herbáceas em área, obtendo-se no final do processo uma pontuação média para o conjunto do subtrecho ou arranjo construtivo implantado no subtrecho. A descrição para classificação das técnicas em cada nível de pontuação pode ser observada no Apêndice A.

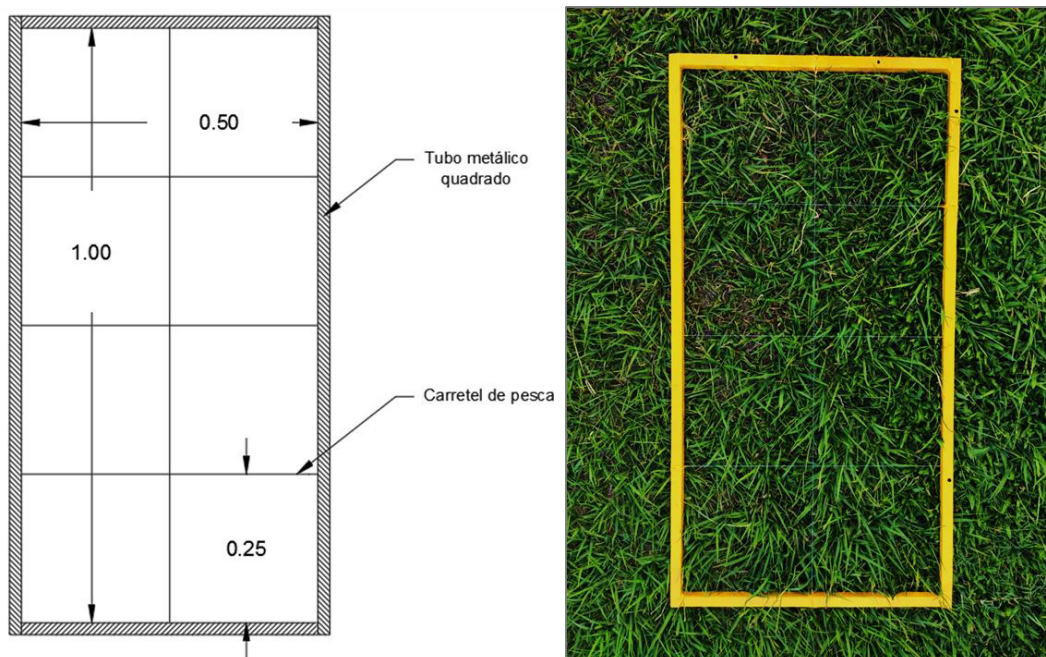
O monitoramento visual do desenvolvimento vegetativo das plantas foi complementado quantitativamente por meio de parcelas permanentes. A implantação das parcelas e o primeiro levantamento de dados nos trechos ME 05 e MD 01 ocorreram em março de 2020. A segunda e terceira campanhas de monitoramento foram realizadas em janeiro de 2021 e dezembro de 2022, respectivamente, considerando sempre um ciclo de enchimento do reservatório e consequente submersão total ou parcial temporária das plantas após cada campanha de monitoramento. Os trechos ME 03 e ME 21 foram avaliados em apenas duas ocasiões, nomeadamente janeiro de 2021 e dezembro de 2022, tendo

em vista que a execução da obra ocorreu um ano após a obra nos trechos ME 05 e MD 01.

Em cada subtrecho foram instaladas 3 parcelas de monitoramento, totalizando 45 parcelas (15 subtrechos) considerando os trechos intervencionados (ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21). As parcelas possuem 1 m de largura e aproximadamente 5 m de comprimento abrangendo desde a crista do talude superior até a última linha de intervenção localizada dentro do reservatório. Cada parcela foi instalada utilizando 8 vergalhões de ferro com 0,30 m de comprimento e 5 mm de diâmetro (Figura 24). A distribuição das parcelas em cada subtrecho foi realizada de forma aleatória, apresentando desta forma espaçamento variável entre parcelas.

As variáveis levantadas em cada parcela nas campanhas de monitoramento para as espécies arbustivas foram: identificação da espécie; altura (m); diâmetro da base (mm) e número de indivíduos mortos. Para as espécies herbáceas foi avaliada a porcentagem de cobertura superficial do talude superior e inferior. Essa porcentagem de cobertura foi avaliada com ajuda de um gabarito com dimensões de 0,50 m x 1,00 m, subdividido em 8 quadrantes com 25 cm de lado (Figura 25).

Figura 25 – Gabarito utilizado para determinação da porcentagem de cobertura superficial do solo proporcionado pelas espécies herbáceas.



Fonte: O autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ANÁLISE DE PROCESSOS EROSIVOS

#### 4.1.1 Caracterização dos pontos de monitoramento

A Tabela 2 apresenta os valores médios dos índices físicos dos solos dos 55 pontos monitorados no reservatório da UHE Itá entre janeiro de 2018 e agosto de 2021 (primeira e quarta campanhas de monitoramento).

Tabela 2 – Índices físicos dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá.  $w_{nat}$ : umidade natural (%);  $\gamma_{nat}$ : peso específico aparente natural ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_d$ : peso específico aparente seco ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_s$ : peso específico dos sólidos ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_{sat}$ : peso específico aparente saturado ( $\text{kN/m}^3$ );  $\gamma_{sub}$ : peso específico submerso ( $\text{kN/m}^3$ );  $e$ : índice de vazios;  $\eta$ : porosidade (%) e  $S$ : grau de saturação (%).

	$w_{nat}$ (%)	$\gamma_{nat}$	$\gamma_d$	$\gamma_s$	$\gamma_{sat}$	$\gamma_{sub}$	$e$	$\eta$ (%)	$S$ (%)
		(kN/m <sup>3</sup> )							
<b>Média</b>	40,0	15,9	11,4	27,4	17,2	7,2	1,42	58,5	77,3
<b>Máximo</b>	56,8	18,2	13,7	28,7	18,8	8,8	1,81	64,4	95,5
<b>Mínimo</b>	24,3	13,6	9,7	26,4	16,1	6,1	0,99	49,8	52,9

Fonte: O autor.

A umidade natural ( $w_{nat}$ ) dos solos variou entre 56,8% e 24,3%, com amplitude de 32,5%. O peso específico aparente natural ( $\gamma_{nat}$ ) variou de 18,2  $\text{kN/m}^3$  a 13,6  $\text{kN/m}^3$ , valores típicos para solos de constituição predominantemente argilosa. O índice de vazios ( $e$ ) variou entre 1,81 e 0,99 e a porosidade ( $\eta$ ) entre 64,4% e 49,8%, correspondendo, em geral, a solos com índices de vazios e porosidade muito altos ( $e > 1$ ;  $\eta > 50\%$ ) segundo classificação de IAEG (1979). O grau de saturação ( $S$ ) variou entre 95,5% e 52,9%, o que representa solos muito úmidos até altamente saturados segundo a classificação de IAEG (1979).

Conforme pode ser visualizado na Tabela 3 e no gráfico textural da Figura 26, os solos estudados apresentam textura variando de franco argilosa a muito argilosa. A fração areia variou entre 25,0% e 1,6%, com média de 8,4%. A fração silte variou entre 49,7% e 6,3%, com média de 31,9% e a fração argila variou entre 92,1% e 28,6%, com média de 59,9%.

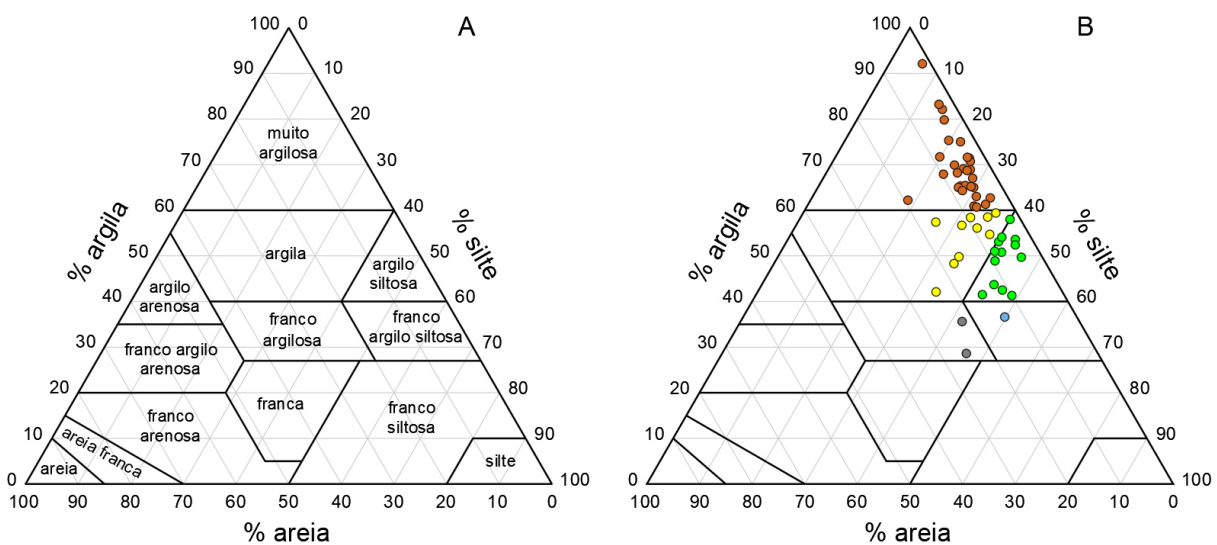
Tabela 3 – Granulometria (areia, silte e argila) e características químicas dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá. MO: matéria orgânica (%).

	Areia	Silte	Argila	MO	pH
	(%)				
<b>Média</b>	8,4	31,9	59,9	1,0	5,0
<b>Máximo</b>	25,0	49,7	92,1	2,8	6,4
<b>Mínimo</b>	1,6	6,3	28,6	0,3	4,0

Fonte: O autor.

Os solos apresentam baixos teores de matéria orgânica (MO) ( $\leq 2,5\%$ ) e valores de pH variando entre médios (5,5 – 6,0) e muito baixos ( $\leq 5,0$ ) segundo o Manual de Adubação e de Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (2004). Apenas um ponto apresentou teores de matéria orgânica acima de 2,5% e um ponto apresentou pH acima de 6,0.

Figura 26 – A – Gráfico com a classificação dos diferentes tipos de textura de solo existentes. B – Distribuição textural dos solos dos 55 pontos de monitoramento no reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor.

Dos 55 pontos estudados, 29 (52%) apresentaram textura muito argilosa; 13 (24%) apresentaram textura argilo-siltosa; 10 (18%) apresentaram textura argilosa; 2 (4%) apresentaram textura franco-argilosa e apenas 1 ponto (2%) apresentou textura franco-argilo-siltosa. Os dados demonstram que os solos estudados são de constituição predominantemente argilosa.

#### 4.1.2 Oscilação do nível de operação do reservatório

O nível normal de operação do reservatório da UHE Itá varia da cota 370 m (nível máximo) a 364 m (nível mínimo). A Figura 27 apresenta os dados de oscilação diária histórica do nível da água para o período de janeiro de 2001 e agosto de 2021.

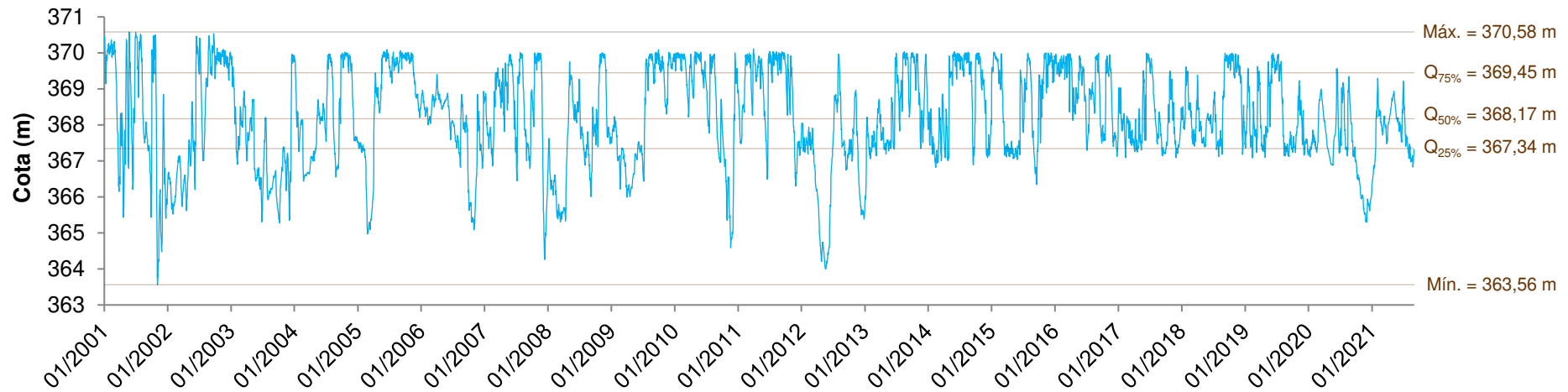
Os dados demonstram que durante a época de cheia do reservatório o nível da água tende a permanecer em cotas próximo da cota máxima ou máxima, oscilando rapidamente para cotas menores seguido de nova elevação para cotas mais altas. De modo geral, os períodos de cheia são seguidos de períodos de depleção e permanência em cotas menores, havendo com frequência picos significativos de elevação do nível do reservatório resultantes de chuvas intensas na bacia de contribuição ou de questões técnicas relacionadas à operação do reservatório.

A transição entre elevação e depleção do nível do reservatório geralmente ocorre de forma abrupta (curto espaço de tempo), conforme demonstrado pela verticalidade da linha que descreve o nível da água.

A cota máxima e mínima histórica atingida pelo reservatório foi de 370,58 m e 363,56 m, respectivamente. Do início da operação até início de 2014 ocorreram inúmeras depleções severas no nível da água (abaixo da cota 367 m). De 2014 a agosto de 2021, o nível da água permaneceu poucas vezes abaixo da cota 367 m, exceto em um evento curto em agosto de 2015 e outro recente e prolongado durante uma seca no ano de 2020. Para o mesmo período, o nível máximo atingido foi de 370 m, denotando oscilação regular com amplitude aproximada de 3 m (370 – 367 m).

A Figura 28 apresenta o número de dias e o tempo (%) que o nível do reservatório permaneceu em diferentes cotas considerando a série histórica de oscilações (janeiro de 2001 a agosto de 2021). A Figura 28A demonstra que o intervalo de cotas em que o reservatório permaneceu o maior número de dias durante a série histórica foi de 369,8 – 369,9 m (em 10 cm de oscilação permaneceu 12,3% do tempo). Outro intervalo de cotas em que o reservatório permaneceu de forma prolongada está situado entre as cotas 367,2 – 367,6 m (em 40 cm de oscilação permaneceu 14,6% do tempo).

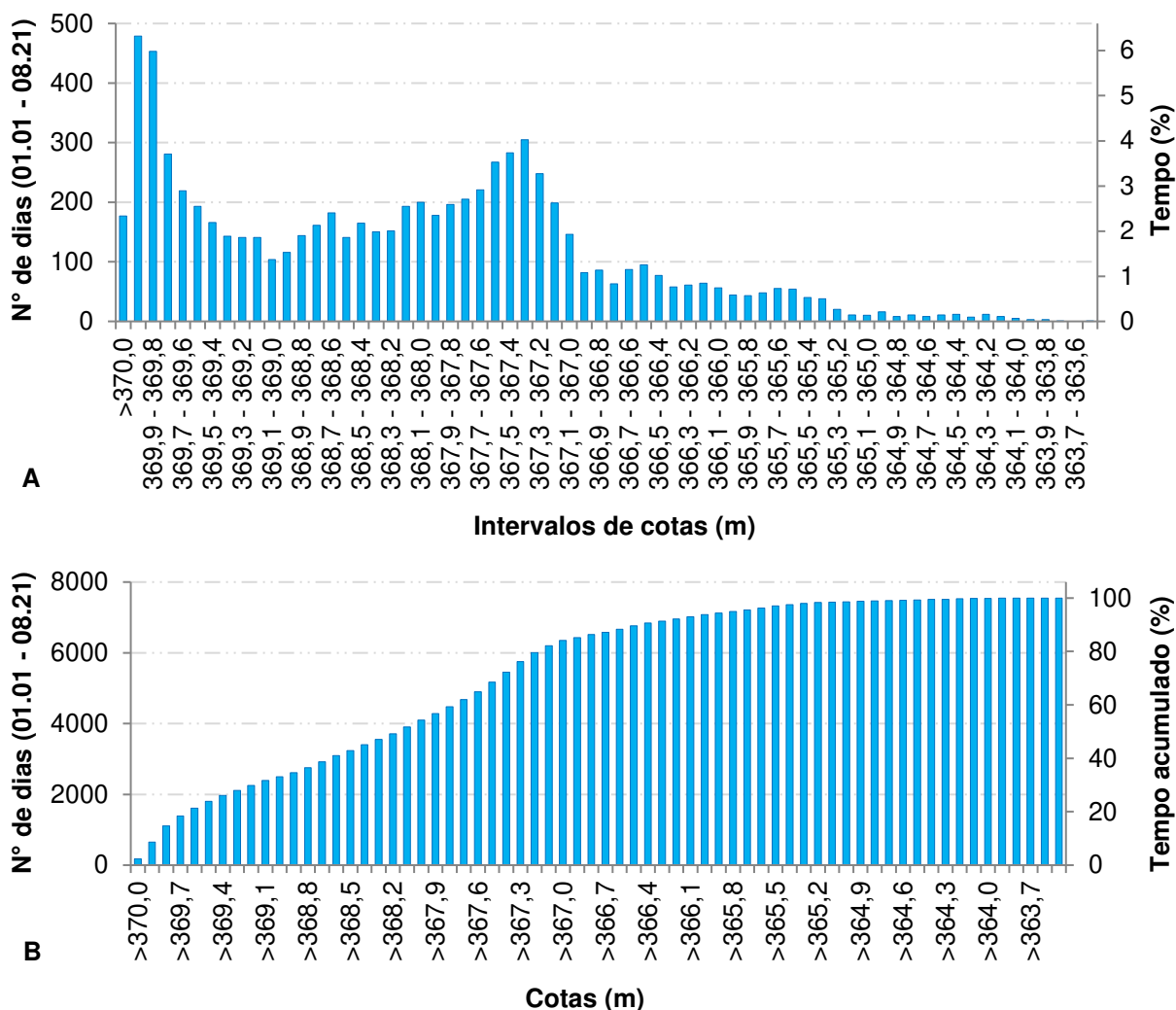
Figura 27 – Oscilação diária histórica do nível de operação do reservatório da UHE Itá entre janeiro de 2001 e agosto de 2021. Q<sub>00%</sub>: quartis.



Fonte: O autor.

Nos intervalos de cotas entre estes dois extremos apresentados o nível do reservatório permaneceu menos dias, comparativamente, o que denota que em cotas intermediárias (<369,8 - >367,6 m) o nível da água se eleva e depleciona mais rapidamente, conforme também pode ser observado na Figura 27. Acima da cota 367 m, o nível da água permaneceu 84,1% do tempo da série histórica (Figura 28B). Estes dados demonstram que em porção significativa do tempo (84,1%) de operação histórica do reservatório, o nível da água permaneceu na metade superior da amplitude total normal de operação do empreendimento (máx. = 370 m; mín. = 364 m).

Figura 28 – A – Número de dias durante o período de janeiro de 2001 e agosto de 2021 e o tempo (%) equivalente em que o nível do reservatório permaneceu em cada intervalo de cotas (m). B - Número de dias durante o período de janeiro de 2001 e agosto de 2021 e o tempo (%) acumulado em que o nível do reservatório permaneceu acima de cada cota (m).



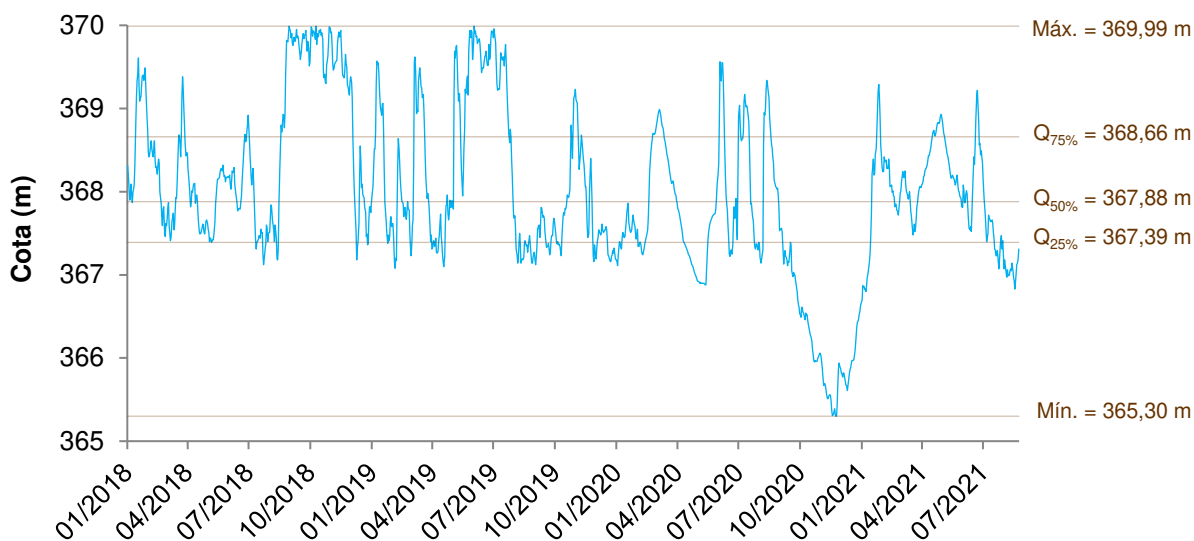
Fonte: O autor.

A Figura 29 apresenta os dados de oscilação do nível de operação do reservatório entre janeiro de 2018 e agosto de 2021, período abrangido pelo monitoramento quantitativo de erosões (primeira e quarta campanha de medição).

Pode-se observar que o nível do reservatório oscilou entre a cota mínima de 365,3 m e máxima de 369,99 m no período considerado, resultando numa amplitude de 4,69 m. Verifica-se a partir dos dados uma severa depleção do nível entre os meses de outubro de 2020 e janeiro de 2021. Rebaixamentos tão expressivos do nível da água também tinham ocorrido em 2013. Também se observa que no período estudado o nível da água não atingiu a cota máxima (370 m) e que no

período entre 2020 e 2021 a cota máxima foi de apenas 369,55 m em junho de 2020. A permanência do nível da água em cotas menores para este período, comparado à série histórica desde 2014, se deve a um período prolongado de seca na bacia de contribuição, levando inclusive à suspensão temporária da operação de usinas hidrelétricas como UHE Machadinho e UHE Passo Fundo, empreendimentos localizados nas proximidades da UHE Itá.

Figura 29 – Oscilação diária histórica do nível de operação do reservatório da UHE Itá entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. Q<sub>00%</sub>: quartis.



Fonte: O autor.

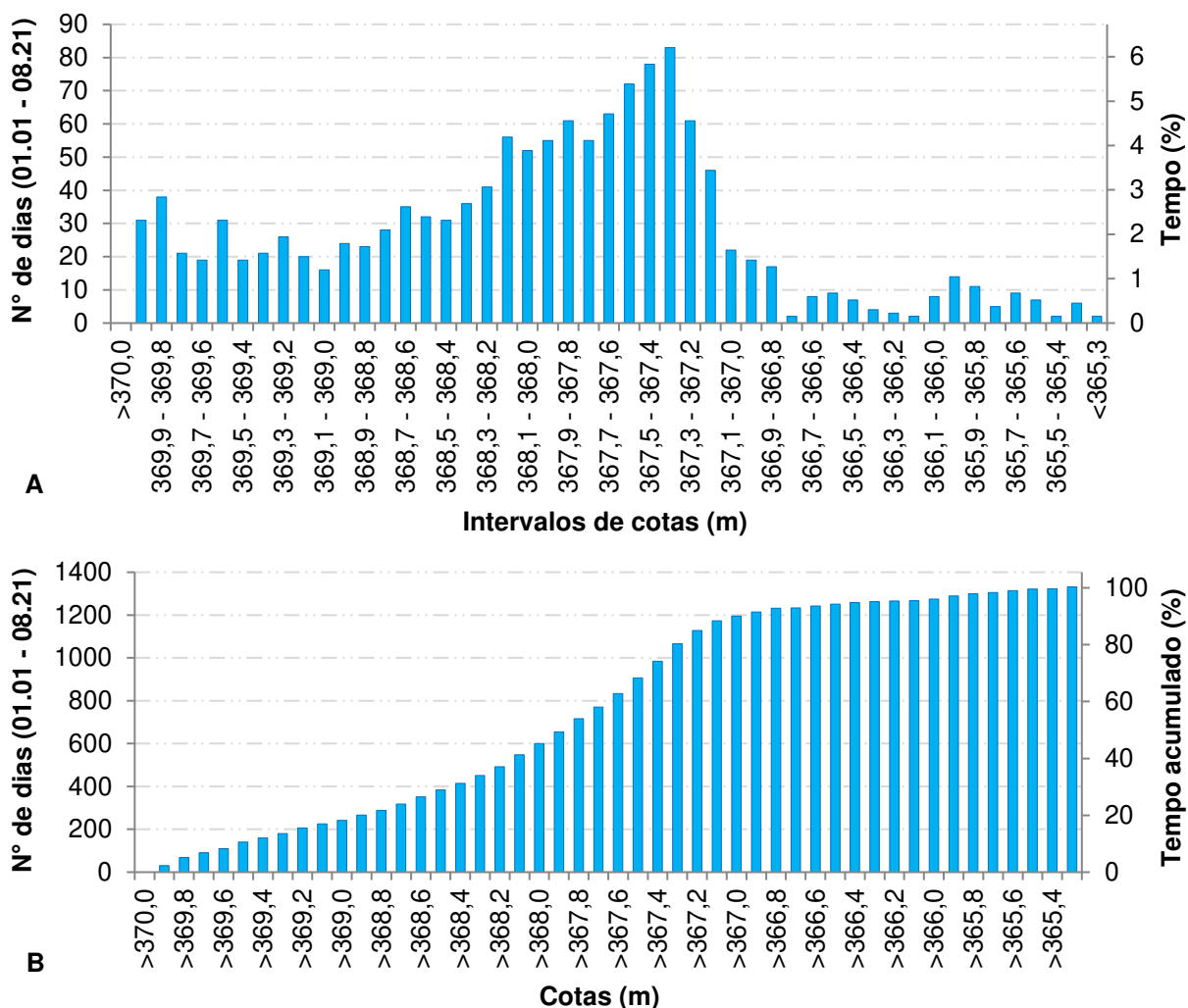
A Figura 30 apresenta o número de dias e o tempo (%) que o nível do reservatório permaneceu em diferentes cotas considerando a série histórica de oscilações durante o monitoramento de erosões (janeiro de 2018 a agosto de 2021).

A Figura 30A demonstra que o nível do reservatório permaneceu em cotas mais baixas por maior período de tempo na série histórica analisada comparado à série completa. O intervalo de cotas entre 367,2 – 367,7 m (0,5 m de amplitude) apresentou os maiores tempos de permanência do nível da água. Os menores tempos foram verificados para as cotas abaixo de 366,8 m (7,4% do tempo acumulado), resultado direto do efeito do período de estio na bacia. Na Figura 30B denota-se que o nível da água oscilou 89,9% do tempo acima da cota 367 m e esta percentagem de tempo só não foi maior devido ao período de seca. Esta cota (367 m) é importante para o estudo em questão porque representa a cota mínima prévia



fixada para o levantamento de erosões com seções topográficas, considerando a segurança e agilidade de levantamento, precisão e a confiabilidade dos dados.

Figura 30 – A – Número de dias durante o período de janeiro de 2018 e agosto de 2021 e o tempo (%) equivalente em que o nível do reservatório permaneceu em cada intervalo de cotas (m). B - Número de dias durante o período de janeiro de 2018 e agosto de 2021 e o tempo (%) acumulado em que o nível do reservatório permaneceu acima de cada cota (m).



Fonte: O autor.

A análise do tempo em que o nível do reservatório permanece em determinada faixa de cotas é importante porque pode explicar parcialmente o quantitativo de solo mobilizado (erodido e depositado) em determinados segmentos do talude. Através da análise da Figura 30 provavelmente espera-se que a ação das ondas seja mais intensa em cotas mais baixas já que o nível do reservatório permaneceu por um período maior nestas cotas durante o intervalo considerado. Bao et al. (2015a) e Bao et al. (2015b) comentam que o tempo que o nível do

reservatório permanece em determinada cota está diretamente relacionado com o quantitativo de erosões observado nesta cota.

Os dados apresentados acima, tanto para a série histórica completa dos níveis do reservatório como para o recorte temporal entre 2018 e 2021, serão utilizados para fundamentar as discussões do comportamento das fenomenologias erosivas observadas nas margens do reservatório, conforme será apresentado a seguir.

#### **4.1.3 Erosão histórica acumulada nas margens**

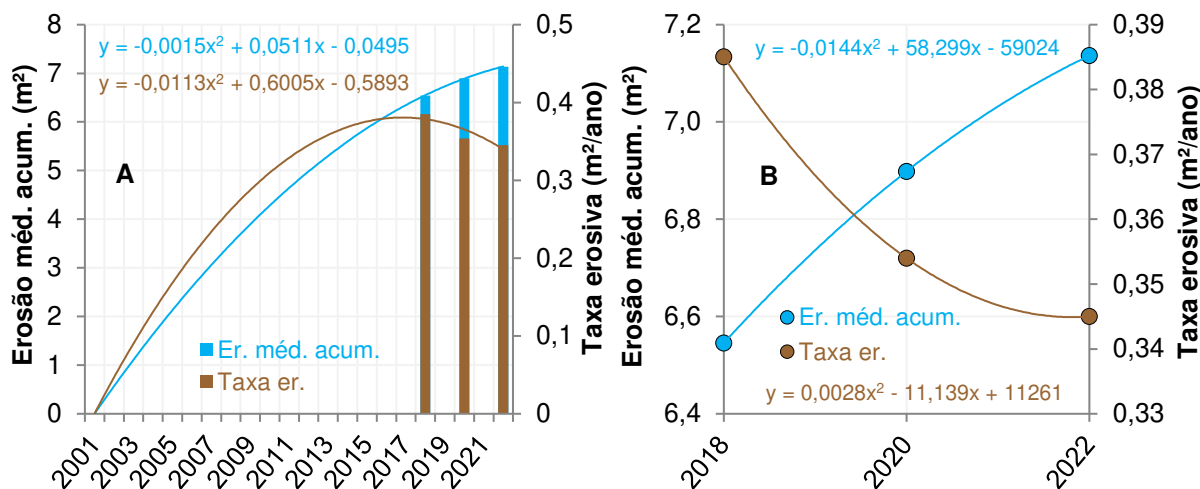
A determinação da erosão acumulada em cada seção topográfica analisada foi realizada conforme representado na Figura 18. A reconstituição do perfil compreende uma reta traçada entre a crista do talude superior até a cota mínima média de 366,65 m ( $\pm 0,35$  m) considerando a seção topográfica de agosto de 2021 (quarta campanha de monitoramento). Considerando a série histórica completa de oscilação do nível da água, o nível do reservatório permaneceu 88,3% do tempo acima desta cota, ou seja, representa um tempo expressivo da operação do reservatório em que a atuação das ondas e o efeito de oscilação atuaram neste intervalo de cotas (366,65 – 370,0 m).

Após reconstituição da superfície original do terreno pode-se determinar o volume de solo erodido desde o início pleno de operação do empreendimento (2001) até 2018 (início do monitoramento de erosões com seções topográficas), bem como o volume erodido nos anos subsequentes de monitoramento até agosto de 2021 (quarta campanha de monitoramento). Os dados obtidos com esta análise são apresentados na Figura 31.

Os dados da Figura 31 revelam uma queda da taxa erosiva entre 2018 - 2020 e 2020 - 2022 em comparação à taxa média verificada entre 2001 e 2018. A taxa erosiva média entre 2001 e 2018 para as seções topográficas analisadas foi de 0,385 m<sup>2</sup>/ano; entre 2001 e 2020 foi de 0,354 m<sup>2</sup>/ano e entre 2001 e 2022 foi de 0,345 m<sup>2</sup>/ano. Estes dados demonstram uma redução de 8,1% entre 2001-2020 e 2001-2018; 2,4% entre 2001-2022 e 2001-2020 e 10,3% entre 2001-2022 e 2001-2018. A erosão média acumulada até 2018, 2020 e 2022 foi de 6,55 m<sup>2</sup>, 6,90 m<sup>2</sup> e 7,14 m<sup>2</sup>, respectivamente.

A taxa decrescente do volume acumulado médio observada nos últimos anos devido à redução da taxa erosiva indica, aparentemente, uma tendência de estagnação dos processos erosivos nas margens. No entanto, a redução da taxa erosiva está possivelmente relacionada ao menor número de dias que o nível do reservatório permaneceu em cotas mais altas. A literatura especializada indica que as maiores perdas de solo nas margens de reservatórios ocorrem quando o nível da água se encontra na cota máxima ou próximo dela (BAO et al., 2015a; BAO et al., 2015b; CYBERSKI, 1973). Comparando-se os níveis da água do reservatório nos últimos anos (2020 a 2022), em que o nível nem sequer alcançou a cota máxima, com os níveis históricos de 2001 até 2019, verifica-se um menor número de dias do nível em cotas elevadas no período recente, o que possivelmente explica a redução da taxa erosiva observada nas margens (Figura 31).

Figura 31 – A – Erosão média acumulada (m<sup>2</sup>) e taxa erosiva média (m<sup>2</sup>/ano) observada desde o início pleno de operação do reservatório (2001) até 2018 (início do monitoramento) e de 2018 até 2021 (final do monitoramento). B - Erosão média acumulada (m<sup>2</sup>) e taxa erosiva média (m<sup>2</sup>/ano) observada entre janeiro de 2018 (início do monitoramento) e agosto de 2021 (final do monitoramento).



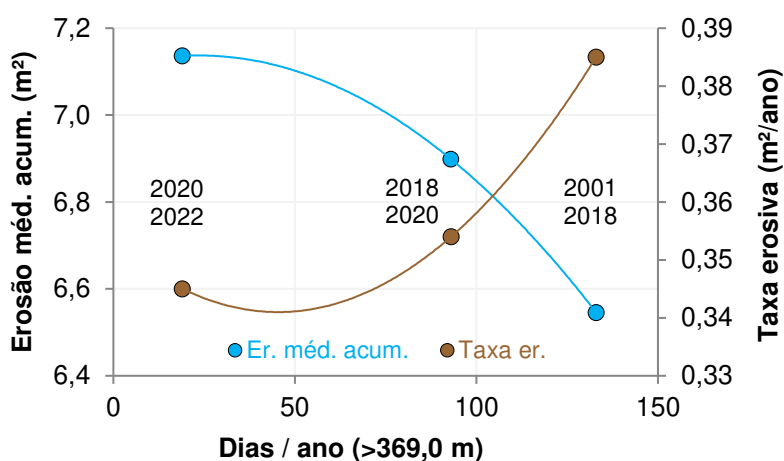
Fonte: O autor.

Outro fator relevante para o reservatório da UHE Itá que reforça a ideia de que os processos erosivos ainda não estão a estagnar é a inexistência de rocha-mãe ou rocha alterada na superfície dos taludes. As margens em monitoramento apresentam perfis de solo profundos e bem desenvolvidos, não ocorrendo exposição de material mais resistente nas margens que poderia denotar decréscimo atual das

taxas erosivas. Reservatórios localizados em relevos encaixados e com grandes oscilações anuais do nível da água podem alcançar a estabilidade das margens após décadas de operação (BANACH, 2006) ou pode inclusive não ser alcançada em caso de intensificação dos processos geomorfológicos (SPANILLA, 1998; NAZAROV, 2008 apud KACZMAREK et al., 2016). Conforme aumenta a amplitude de oscilação do nível normal de operação e a área superficial do reservatório, aumenta o tempo para que as margens atinjam a sua estabilidade considerando a nova geometria adquirida pelas novas solicitações impostas pelo reservatório (BANACH, 2006). O reservatório Bratsk, na Rússia (oscilação anual de 4,0 m e área de 5470 km<sup>2</sup>), mesmo em operação há mais de 50 anos, continua a apresentar processos erosivos intensos nas margens (recuos médios de 1,4 m/ano) (KACZMAREK et al., 2016).

Os dados da Figura 32 indicam que até 2018 o número médio de dias por ano em que o nível do reservatório permaneceu acima da cota 369 m foi de 133 dias. Entre 2018 e 2020 esse quantitativo reduziu-se a 93 dias e entre 2020 e 2022 foi de apenas 19 dias por ano.

Figura 32 – Erosão média acumulada (m<sup>2</sup>) e taxa erosiva média (m<sup>2</sup>/ano) em função do número médio de dias por ano em que o nível do reservatório permaneceu acima da cota 369,0 m de 2001 a 2018, de 2018 a 2020 e de 2020 a 2022.



Fonte: O autor.

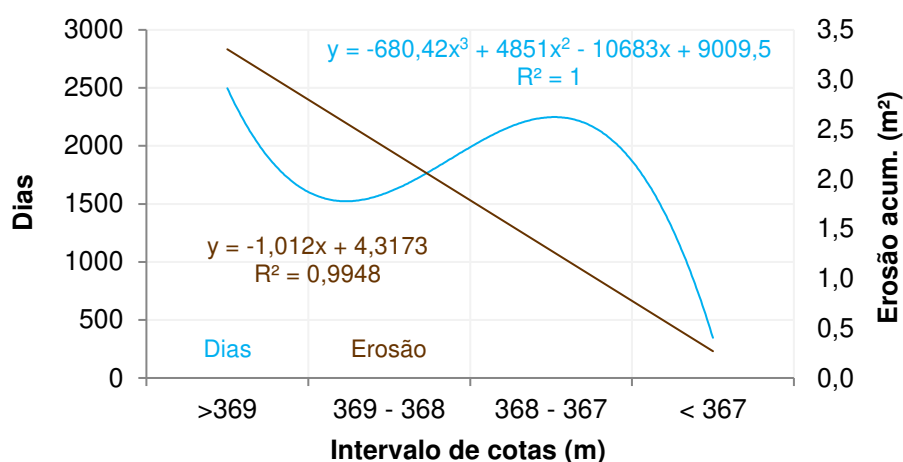
Essa redução do número de dias acima da cota 369 m nos intervalos analisados se relaciona com a redução do quantitativo de solo erodido da margem (redução da taxa erosiva), denotando a importância do regime de oscilação do nível

da água sobre os processos depreendidos. A mesma tendência de redução do número de dias também foi observada para o intervalo de cota acima de 368 m.

Cabe destacar que os quantitativos de solo erodido e as respectivas taxas erosivas são válidas para margens com perfis de solo profundos, sem presença de rocha saprolítica ou rocha mãe exposta na superfície dos taludes. Desta forma, as margens em análise são altamente suscetíveis e fornecem sedimentos na medida e intensidade que os agentes erosivos as solicitam, não havendo estagnação visual e quantitativa dos processos erosivos.

Os maiores quantitativos de perda de solo ocorrem em cotas mais altas conforme pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 – Número de dias em que o nível da água do reservatório da UHE Itá permaneceu nos diferentes intervalos de cota (m) e a erosão acumulada média (m<sup>2</sup>) nas respectivas cotas para o período de 2001 a agosto de 2021.



Fonte: O autor.

A Figura 33 apresenta a erosão média acumulada por intervalo de cota nas seções acima da cota média de 366,65 m desde 2001 até agosto de 2021 (7060 dias) e os respectivos dias em que o reservatório permaneceu em cada intervalo de cotas. A erosão acumulada média por seção representa 7,15 m<sup>2</sup>, sendo 3,27 m<sup>2</sup> (45,7%) removido das cotas >369,0 m; 2,28 m<sup>2</sup> (31,9%) entre as cotas 368 – 369 m; 1,41 m<sup>2</sup> (19,8%) entre as cotas 367 – 368 m e apenas 0,18 m<sup>2</sup> (2,6%) abaixo da cota 367 m. O tempo de permanência do reservatório acima da cota 369 m foi de 35,4% do tempo total; 22,7% entre as cotas 368 – 369 m; 31,8% entre as cotas 367 – 368 m e apenas 4,9% abaixo da cota 367 m. Estes dados indicam, para os intervalos de

cota acima de 368 m, a perda aproximada média de 1 m<sup>2</sup> de solo a cada 10% do tempo (aprox. 700 dias) que o nível do reservatório permaneceu nestes intervalos de cotas. Para as cotas abaixo de 368 m, demandou-se aproximadamente 25% do tempo do período para cada 1 m<sup>2</sup> de solo removido do perfil.

De modo geral, os dados indicam uma menor perda de solo em cotas mais baixas dentro do reservatório em comparação às cotas mais altas. Em cotas abaixo de 367 m a erosão é pouco expressiva, representando em torno de 5% do total erodido na cota acima de 369 m, por exemplo. Essa erosão pouco expressiva se deve, em parte, porque o nível do reservatório permaneceu apenas 14,8% do tempo abaixo desta cota, de modo que o talude permaneceu submerso a maior parte do tempo e, portanto, esteve menos sujeito ao impacto direto das ondas. Por outro lado, acima da cota 369 m foram verificadas as maiores perdas de solo, resultado provavelmente da geometria desfavorável (inclinação e altura) combinado com o grande número de dias em que o nível do reservatório esteve acima desta cota. Os taludes nestas cotas geralmente apresentam altas inclinações, sendo por vezes verticais e até mesmo negativos próximo da crista. Quando o reservatório se encontra cheio ou praticamente cheio, as ondas impactam frontalmente os taludes, solapando-os e transferindo a energia cinética transportada, gerando grandes perdas de solo.

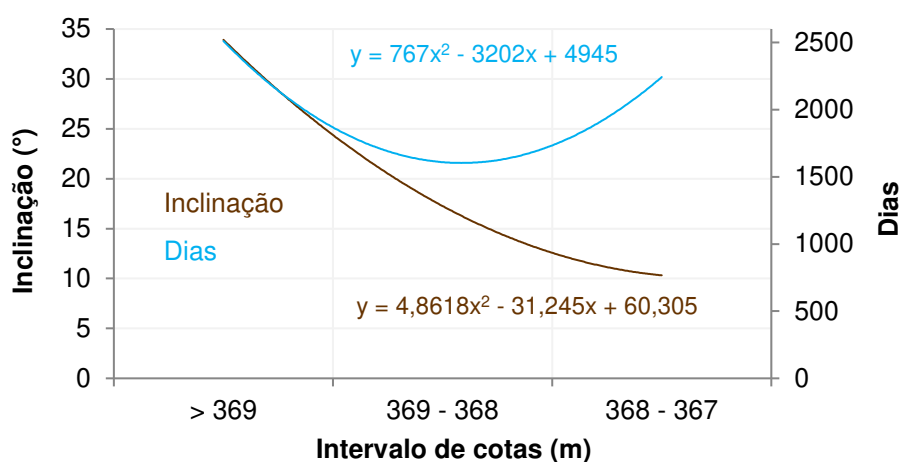
Um aspecto interessante para o intervalo de cotas 367 – 368 m é a proporção entre o número de dias do nível nestas cotas e a perda de solo. Essa menor perda de solo pode ocorrer devido à menor inclinação do talude inferior neste intervalo de cotas (Figura 34), combinado também à reduzida remoção de solo nas cotas abaixo de 367 m.

Inclinações mais suaves da plataforma de abrasão (367 – 368 m) tendem a resultar na formação de ondas do tipo deslizante que apresentam menor energia cinética e que, portanto, apresentam menor potencial de causar erosões (KFK, 2007). Essas condições podem ocasionar uma maior estabilidade da margem em cotas inferiores em comparação às cotas mais altas, mesmo com o nível da água oscilando por longos períodos nessas cotas. Outro aspecto relevante é que as cotas inferiores recebem sedimentos oriundos das cotas superiores, havendo, portanto, uma tendência de aporte regular de sedimentos e manutenção da feição do talude.

Os dados apresentados acima permitem extrair informações importantes para a fase de projeto básico-executivo de controle de erosões em reservatórios. Uma

vez identificadas as cotas do talude em que ocorrem as maiores e as menores perdas de solo, isto permite ao profissional projetista uma decisão mais assertiva quanto à alocação de técnicas na margem, otimizando o tratamento das cotas mais problemáticas. A análise e definição da faixa do terreno em que os processos erosivos são significativos para o reservatório da UHE Itá serão abordadas mais adiante.

Figura 34 – Inclinação média (°) dos taludes dentro do reservatório (talude superior e inferior) e dias de oscilação do nível da água em diferentes intervalos de cotas (m) considerando a série histórica de oscilação de janeiro de 2001 a agosto de 2021.



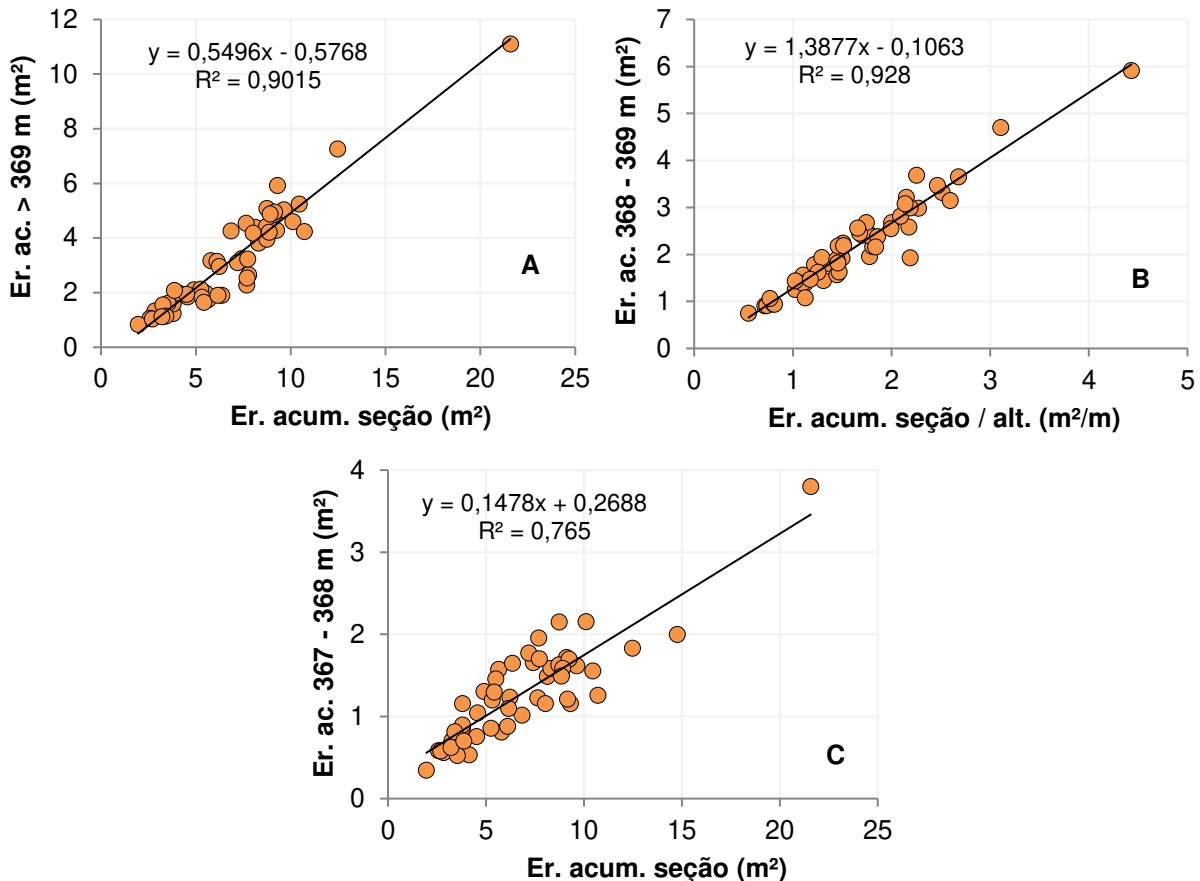
Fonte: O autor.

Os volumes de erosões acumulados nos intervalos de cotas com perdas significativas de solo (>367 m) (Figura 18) apresentam relação linear com o volume total de solo removido da seção topográfica como um todo, conforme pode ser observado na Figura 35. Os dados compreendem as erosões de janeiro de 2001 até agosto de 2021. Cabe destacar que o termo “volume de erosão acumulado (m³)” é equivalente à “área erodida acumulada (m²)” na seção topográfica considerando comprimento unitário de margem.

Para o reservatório da UHE Itá, as erosões históricas verificadas nas margens acima da cota 367 m representam mais que 97% do total das erosões. O volume erodido acima da cota 369 m representa 45,7% do total; entre a cota 368 – 369 m 31,9%; entre a cota 367 – 368 m 19,8% e abaixo da cota 367 apenas 2,6% do total médio erodido. Conforme mencionado nas discussões acima e apresentado na

Figura 35, as maiores perdas históricas de solo ocorrem na cota final do reservatório (>369 m), seguido do intervalo de cotas 368 – 369 m e 367 – 368 m.

Figura 35 – A – Erosão acumulada (m<sup>2</sup>) na seção acima da cota 369 m em função da erosão total acumulada na seção (m<sup>2</sup>). B - Erosão acumulada (m<sup>2</sup>) na seção no intervalo de cota entre 368 m e 369 m em função da erosão total acumulada na seção (m<sup>2</sup>) e da altura total da seção (m). C - Erosão acumulada (m<sup>2</sup>) na seção no intervalo de cota entre 367 e 368 m em função da erosão total acumulada na seção (m<sup>2</sup>).



Fonte: O autor.

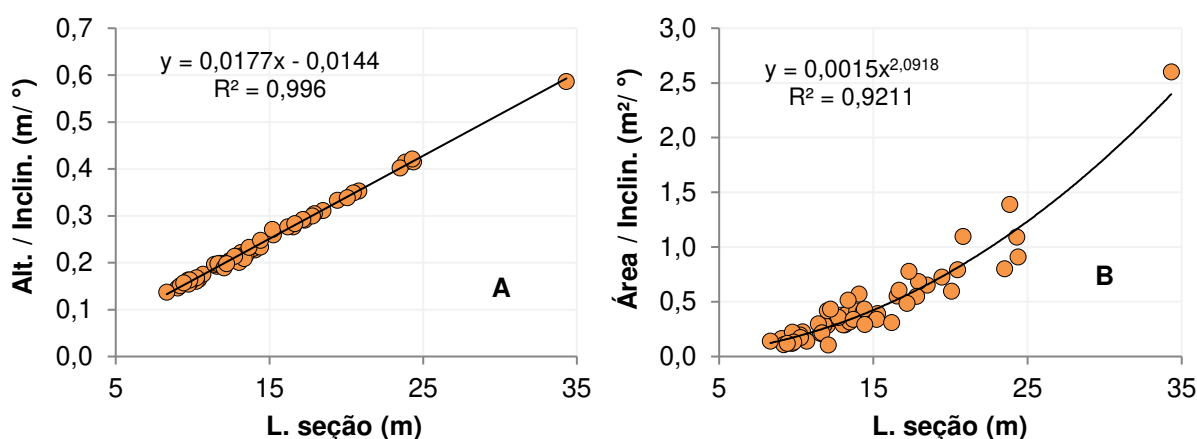
Os dados acima permitem uma análise relativa dos processos erosivos, o que é especialmente interessante quando se visa a compartimentação das erosões por intervalos de cotas para obtenção de informações técnicas do comportamento da fenomenologia para posterior aplicação em fins diversos. Este tipo de análise também pode ser realizado adotando-se intervalos de cotas menores, obtendo-se maior detalhamento dos processos em diferentes seções da margem.



#### 4.1.4 Método de determinação de erosões acumuladas nas margens

A partir da análise das seções topográficas com a superfície original reconstituída e das respectivas áreas transversais de solo erodido constatou-se uma seção transversal típica similar a um triângulo. Com base nas feições deste triângulo e outros parâmetros geométricos extraídos das seções foram desenvolvidas relações matemáticas entre estes elementos que, através de um procedimento simples, proporcionassem a determinação do quantitativo total erodido nas seções. As variáveis utilizadas estão identificadas na Figura 18 e as relações obtidas estão apresentadas na Figura 36.

Figura 36 – A – Relação entre o comprimento da seção (L.) (m) e a relação altura total da seção (Alt.) (m) e inclinação da superfície reconstituída (Inclin.) (°). B - Relação entre o comprimento da seção (L.) (m) e a relação da área total erodida da seção (Área) (m<sup>2</sup>) e inclinação da superfície reconstituída (Inclin.) (°). O comprimento da seção (L.) é tomado da crista do talude superior até a cota mínima (m) de reconstituição da seção, conforme representado na Figura 18.



Fonte: O autor.

As variáveis apresentadas na Figura 36 para as 55 seções analisadas foram obtidas considerando a crista do talude superior e a cota mínima de reconstituição da superfície do terreno, conforme representado na Figura 18. O comprimento do terreno na seção (L. seção) (m) variou entre 8,3 m e 34,3 m. Grandes comprimentos são típicos de seções com taludes inferiores suaves e pequenos comprimentos de taludes inferiores íngremes. A inclinação da superfície reconstituída variou entre 8° e 32° e a área erodida total entre 2001 e 2021 variou entre 2,0 m<sup>2</sup> e 21,6 m<sup>2</sup>. A altura das seções variou entre 2,7 m e 6,4 m. Cabe ainda destacar que as relações matemáticas acima não diferenciam seções com ou sem presença de blocos de

rocha na superfície, tamanho do *fetch*, as propriedades intrínsecas dos solos de cada local, orientação em relação à margem, localização em baías, corpo do reservatório ou tributário, entre outros. A análise baseia-se apenas nas relações existentes entre os parâmetros geométricos extraídos das seções topográficas, portanto, as relações encontradas são válidas para diferentes fisionomias de margem e condições locais.

O objetivo das relações apresentadas acima é propor um procedimento simples e econômico de acompanhamento da evolução das erosões históricas nas margens do reservatório da UHE Itá e em outros reservatórios brasileiros. Considerando a Figura 18, o método propõe a obtenção de apenas dois pontos de monitoramento georreferenciados (X, Y, Z) utilizando GPS – RTK, ou tecnologia equivalente, nomeadamente na crista do talude superior e na cota mínima de reconstituição da superfície original do terreno. O ponto crítico do método reside na definição da cota mínima de levantamento para cada reservatório, abaixo da qual os processos erosivos são insignificantes quantitativamente em comparação às cotas superiores. A cota mínima de levantamento para o reservatório da UHE Itá foi definida a partir das seções topográficas abrangendo as feições dos taludes inferiores, resultando na cota média de 366,65 m. Acima desta cota, considerando a série histórica completa de oscilação, o nível da água do reservatório permaneceu 88,3% do tempo. Considerando os resultados apresentados anteriormente que indicam pouca erosão na margem abaixo da cota 367 m para o reservatório em questão, o critério de tempo de permanência do nível da água aparenta ser promissor para definição da cota mínima de levantamento para outros reservatórios e quando não se dispõe de um levantamento detalhado das margens com seções topográficas.

Uma vez definida e fixada a cota mínima de levantamento, o acompanhamento da evolução das erosões nas margens é realizado por meio de levantamentos regulares, conforme escala temporal desejada, da crista do talude superior e da cota mínima. Com estes pontos georreferenciados e processados em software apropriado, pode-se obter facilmente a altura da seção e a inclinação da reta que une os dois pontos (L. superfície) (Figura 18), estimando-se a seguir o comprimento da seção (L. seção) (Figura 36A). Como L. superfície e L. seção são proporcionais, à medida que L. superfície aumenta devido ao recuo da margem, L. seção também aumenta, mantendo-se a proporção entre estas variáveis no tempo.

Esta proporção possivelmente será válida também para outros reservatórios com regime de oscilação similar do nível da água.

Para a variável altura da seção, conforme os processos erosivos avançam recuando a margem, há uma tendência de aumento da altura da seção decorrente da inclinação do terreno natural no entorno do reservatório. Se a altura aumenta, L. seção também aumenta, mantendo as relações de proporcionalidade entre estas variáveis. Por fim, na posse de L. seção e da inclinação da superfície recomposta, pode-se estimar a erosão acumulada na margem (Figura 36B).

A aplicabilidade do método para outros reservatórios poderá ser melhor aferida após validação dos modelos. Os reservatórios da UHE Jaguará (SP/MG) e UHE Miranda (MG), também operados pela Engie Brasil Energia, tiveram suas margens monitoradas quantitativamente com a mesma metodologia de monitoramento adotada nesta pesquisa e descrita detalhadamente por DEWES (2019). Considerando as características técnicas dos dois empreendimentos, estes dados de monitoramento poderão ser utilizados numa fase posterior para confirmação da aplicabilidade do método a outras realidades lacustres no Brasil. Além disso, o método objetiva e estimula o monitoramento quantitativo de erosões em larga escala, tendo em vista o custo reduzido de obtenção de dados, em contraponto ao monitoramento anual majoritariamente visual e qualitativo realizado atualmente por muitas empresas do setor.

#### **4.1.5 Fisionomias das margens e mobilização de solo**

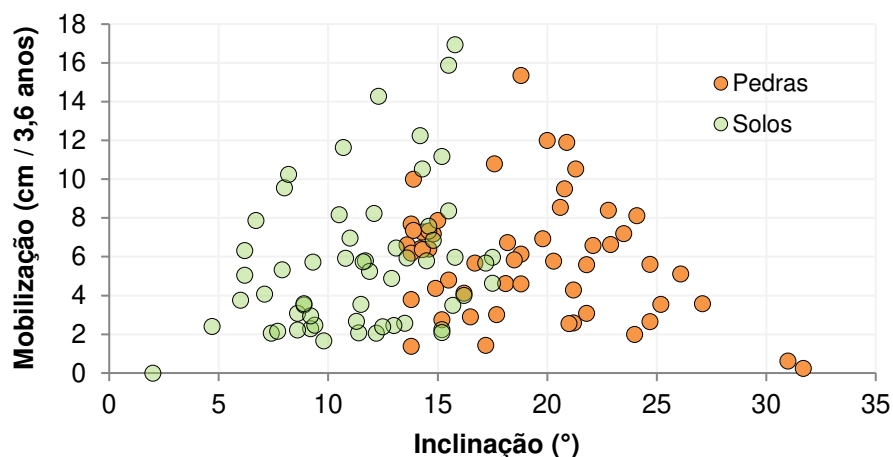
O conjunto de 55 pontos monitorados no reservatório da UHE Itá está distribuído em trechos com diferentes fisionomias, englobando taludes completamente ou parcialmente recobertos superficialmente por blocos de rocha no talude inferior até taludes completamente desprotegidos. As características geométricas destes taludes também variam consideravelmente quanto à altura e inclinação. De modo a investigar a influência destas diferentes fisionomias sobre os processos erosivos nas margens foi elaborado o ábaco apresentado na Figura 37.

O ábaco relaciona a camada de solo mobilizada (cm) no talude inferior entre janeiro de 2018 (primeiro monitoramento) e agosto de 2021 (quarto monitoramento) (3,6 anos) com a respectiva inclinação ( $^{\circ}$ ) do talude inferior, considerando taludes

com e sem presença de blocos de rocha na superfície. A inclinação dos taludes inferiores dos pontos monitorados variou de 2,0° a 31,7° e a camada de solo mobilizada no talude inferior variou de 0,0 cm a 16,9 cm.

Os pontos em verde representam taludes sem presença de pedras e com inclinações menores do talude inferior variando de 2,0° a 17,5°. Para inclinações do talude até 2° - 3°, a mobilização de solo observada inexistiu ou é mínima, respectivamente. Cyberski (1973) afirma que taludes inferiores com inclinações de até 4° não estão sujeitos a perdas de solo pela ação das ondas.

Figura 37 – Mobilização de solo (cm/3,6 anos) no talude inferior em função da inclinação do talude inferior (°) abrangendo pontos de monitoramento em todo o reservatório e diferentes fisionomias de margens. O período de 3,6 anos corresponde ao intervalo entre a primeira (janeiro de 2018) e a quarta campanha de monitoramento (agosto de 2021).



Fonte: O autor.

À medida que a inclinação aumenta, a mobilização de solo aumentou considerando os pontos sem blocos de rocha. No outro extremo da inclinação encontram-se taludes completamente recobertos por blocos de rocha de ocorrência natural. Devido à natureza do material rochoso, estes taludes apresentam inclinações maiores quando comparado aos taludes de solo desnudo. Apesar das altas inclinações, a eficiente cobertura superficial proporcionada pelos blocos de rocha minimiza a mobilização de solo, o que sugere que estes taludes tendem a sofrer pouca perda de solo depois de plenamente estabelecidos. Para este tipo de taludes com inclinações acima de 30°, as mobilizações de solo observadas foram da ordem de 0,2 cm a 0,6 cm no período analisado. Os aspectos geométricos gerais

dos dois extremos de fisionomias de margens monitoradas estão representados na Figura 38.

Já os taludes cobertos parcialmente por blocos de rocha tendem a apresentar inclinações intermediárias e maiores que  $14^\circ$ . Nestes locais monitorados verificam-se maiores amplitudes de inclinações e espessuras de solo mobilizado em comparação a taludes densamente recobertos por blocos de rocha. Esse aspecto pode ser devido a diferentes taxas de cobertura dos taludes e dimensões dos blocos, ou seja, ocorrência de blocos esparsos até relativamente abundantes na superfície. Um dos motivos deste comportamento pode ser decorrente do desenvolvimento de turbilhonamentos diferenciais entre os blocos de rocha no momento da rebentação das ondas, resultando em diferentes quantidades de solo mobilizadas na margem. Cyberski (1973) observou diferentes magnitudes de erosões em margens de reservatório que apresentavam blocos de rocha com dimensões variadas, e observou que estas magnitudes estavam condicionadas à granulometria e porosidade do material.

Figura 38 – A – Fisionomia geral de seção de monitoramento com talude inferior suave e ausência de blocos de rocha. B – Fisionomia geral de seção de monitoramento com talude inferior íngreme e densamente recoberto por blocos de rocha.



Fonte: O autor.

Taludes localizados em baías e desprovidos de blocos de rocha no talude inferior apresentaram menores mobilizações de solo quando comparados a taludes similares localizados no corpo do reservatório. A espessura máxima da camada de solo mobilizada nestes pontos se situou em torno de 3,0 cm no período analisado. Esta menor mobilização de solo em baías pode ser explicada devido a maior

proteção dos taludes contra os efeitos das ondas proporcionada pelo contorno sinuoso do relevo (REID, 1992; SU et al., 2017) em comparação a taludes em trechos retilíneos no corpo principal do reservatório (BAO et al., 2018; SU et al., 2017).

Do ponto de vista prático, a classificação dos trechos apresentada na Figura 37 é importante porque permite uma compreensão geral sobre a influência das diversas fisionomias na provável fenomenologia atuante nas margens. Informações como estas podem ser utilizadas na tomada de decisão de áreas prioritárias de intervenção, valendo-se de critérios técnicos quantitativos ao invés de qualitativos, aumentando a assertividade na gestão de reservatórios.

#### **4.1.6 Faixa de terreno com processos erosivos significativos**

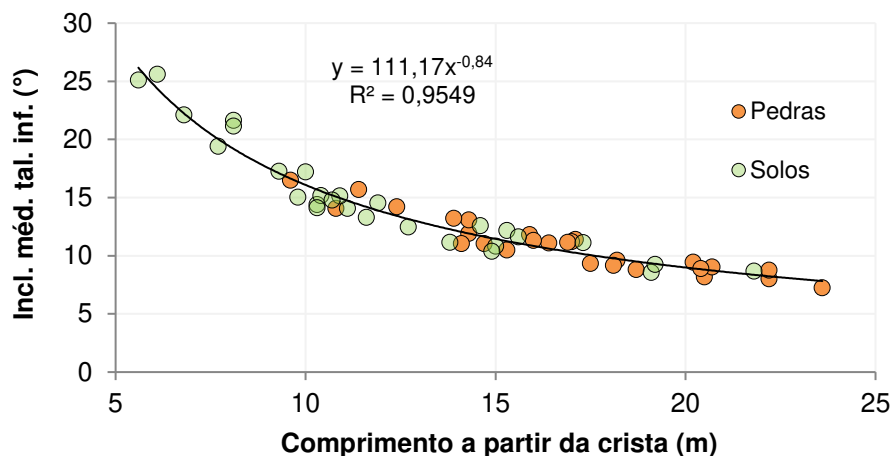
A faixa de terreno na margem em que ocorrem processos erosivos significativos é medida na seção topográfica desde a crista do talude superior até uma cota mínima dentro do reservatório (talude inferior), conforme representado na Figura 18. A cota mínima compreende o ponto em que as seções topográficas de monitoramentos subsequentes coincidem ou o seu distanciamento pode ser considerado insignificante comparado à modificação do terreno verificada nas cotas superiores dentro do reservatório. Para o reservatório da UHE Itá, esta faixa foi determinada desde a crista do talude superior até a cota mínima de 366,97 m (aprox. 367 m) e é descrita pelo modelo apresentado na Figura 39, levando em consideração a inclinação ( $^{\circ}$ ) média do talude inferior.

Cabe salientar que o modelo não distingue entre erosão e deposição de solo na margem, mas descreve a faixa do terreno em que estes dois fenômenos apresentam relevante magnitude. Os dados da Figura 39 equivalem aos processos erosivos observados nas 55 seções topográficas entre janeiro de 2018 (primeira campanha) e agosto de 2021 (quarta campanha de monitoramento).

Os dados obtidos corroboram os dados e as discussões apresentadas para a Figura 33, ou seja, as maiores mobilizações de solo no talude inferior ocorrem acima da cota 367 m para o reservatório da UHE Itá. Entre janeiro de 2018 e agosto de 2021, o nível do reservatório permaneceu 89,9% do tempo (1196 dias) acima desta cota, tempo este muito similar ao apresentado nas discussões dos dados da Figura

36 relativo à definição de cota mínima para aplicação do método no estudo de erosões históricas acumuladas.

Figura 39 – Relação entre comprimento (m) medido no terreno a partir da crista do talude superior até a cota com erosão significativa dentro do reservatório e a inclinação média (°) do talude inferior, considerando pontos de monitoramento com e sem blocos de rocha na superfície do talude inferior.



Fonte: O autor.

Com base nos dados e discussões apresentadas para o reservatório da UHE Itá, é interessante observar a influência do regime de oscilação do nível de operação do reservatório na dinâmica de modificação das feições dos taludes dentro do reservatório. O tempo de permanência do nível da água nos diferentes intervalos de cota condiciona os quantitativos de solo erodido e depositado nas margens, fornecendo informações técnicas importantes para a tomada de decisão e gestão do reservatório.

#### 4.1.7 Recuos e erosões médias no talude superior e inferior

A Tabela 4 apresenta os valores médios de recuo horizontal, quantidade de erosão e características geométricas no talude superior considerando diferentes usos de solo no terreno natural para os 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021, primeira e quarta campanha de monitoramento, respectivamente.

Os dados mostram que o menor recuo da crista (medido na horizontal) foi verificado para as seções com vegetação secundária arbórea no terreno natural (4,1 cm), seguido das seções com capoeira (13,6 cm) e pastagem (25,9 cm). Os valores

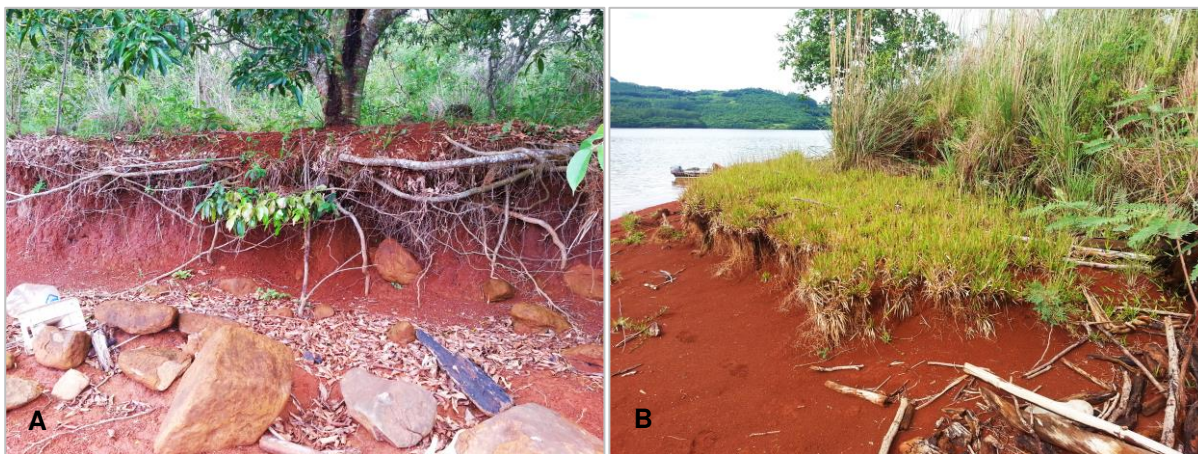
de recuo para os locais com vegetação secundária foram consideravelmente menores em comparação aos demais tipos de solo. Isto pode estar relacionado, em parte, ao efeito positivo de estruturação do solo proporcionado pelas raízes deste tipo de vegetação, aumentando a resistência do maciço diante da ação de solapamento provocado pelas ondas quando o nível se encontra em cotas altas (Figura 40A).

Tabela 4 - Valores médios de recuos da crista (cm), erosão (m<sup>2</sup>), comprimento (m) e recuo médio (cm) do talude superior considerando diferentes tipos de usos do solo no terreno natural. TS: talude superior.

Uso do solo	Valores médios			
	Recuo crista (cm)	Erosão TS (m <sup>2</sup> )	Comp. TS (m)	Recuo TS (cm)
Veg. secundária	4,1	0,08	1,8	4,8
Capoeira	13,6	0,12	1,2	8,1
Pastagem	25,9	0,13	1,2	10,1

Fonte: O autor.

Figura 40 – A – Detalhe do sistema radicial de indivíduo arbóreo parcialmente exposto auxiliando na estruturação do solo o controle do recuo da margem. B – Detalhe de bloco de solo rompido e depositado na base do talude superior colonizado por gramíneas.



Fonte: O autor.

O efeito das raízes na zona da crista dos taludes costuma resultar, muitas vezes, em inclinações negativas, pois a estruturação do solo pelas raízes impede que a porção superior do talude rompa e tombe para dentro do reservatório. Este efeito também ocorre em talude com predominância de gramíneas, embora seja menos proeminente, resultando geralmente em rompimento e deposição de blocos



de solo no pé do talude superior (Figura 40B). A vegetação secundária também desenvolve sistemas radiciais resistentes em profundidade, contribuindo para a estabilidade do maciço por meio do ancoramento e escoramento das camadas de solo.

As seções com vegetação secundária também apresentaram as menores quantidades de solo erodido ( $0,08 \text{ m}^2$ ), em contraste com as seções com predomínio de gramíneas ( $0,13 \text{ m}^2$ ) seguido de formação de capoeira ( $0,12 \text{ m}^2$ ). Da mesma forma como para o recuo, o melhor desempenho foi verificado para a vegetação secundária e o pior desempenho para os pontos com pastagem (gramíneas). O desempenho da vegetação secundária é ainda mais expressivo considerando o comprimento médio dos taludes em que esta quantidade de solo foi removida (1,8 m), ligeiramente superior que para os pontos com gramíneas e capoeira (1,2 m).

O menor recuo médio (cm) do talude superior foi verificado para a área com vegetação secundária (4,8 cm). Os maiores recuos foram observados nos pontos com gramíneas (10,1 cm) seguido dos pontos com capoeira (8,1 cm). Os dados indicam uma consistência para as variáveis analisadas, cujo melhor desempenho é observado nos trechos que apresentam vegetação secundária no terreno natural. Por outro lado, os piores desempenhos são observados para os pontos em que há predomínio de gramíneas, de modo que o recuo médio do talude superior é o dobro dos pontos com vegetação secundária. Estes resultados ajudam a compreender o efeito e a importância da manutenção de faixas de proteção permanente (APP's) bem conservadas ao longo do perímetro do reservatório, que podem contribuir substancialmente para o controle dos processos erosivos. Menores perdas de solo também resultam em índices de turbidez menores da água, maior entrada de luz no reservatório e menores perdas de biodiversidade no longo prazo devido à redução da faixa de APP do empreendimento. Concomitantemente, conflitos com proprietários lindeiros também são minimizados através da manutenção de áreas produtivas.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de erosão, comprimento e recuo dos taludes superior e inferior, com e sem presença de blocos de rocha, considerando os 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.

Em termos absolutos, a erosão observada no talude superior foi menor ( $0,12 \text{ m}^2$ ) que no talude inferior ( $0,49 \text{ m}^2$ ). No entanto, o comprimento médio do talude

superior é de apenas 1,3 m, enquanto no talude inferior esse comprimento é de 10,4 m, uma vez que esta faixa do terreno é mais suave e abrange intervalos maiores de cota. A partir da erosão ( $m^2$ ) e comprimento dos taludes (m) de cada seção foram calculados em recuos médios (cm) dos taludes para efeitos de comparação. Os resultados indicam recuos consideravelmente maiores no talude superior em comparação ao talude inferior. Cabe destacar que esta análise não diferencia seções com ou sem presença de blocos de rocha na superfície.

Tabela 5 – Valores médios de erosão ( $m^2$ ), comprimento (m) e recuo (cm) da margem considerando o talude superior e inferior com ou sem blocos de rocha na superfície.

Porções do talude	Valores médios		
	Erosão ( $m^2$ )	Comprimento (m)	Recuo (cm)
Talude superior	0,12	1,3	8,2
Talude inferior	0,49	10,4	5,3
Talude superior - Blocos	0,10	1,5	7,3
Talude superior - Solos	0,13	1,1	9,2
Talude inferior - Blocos	0,43	8,2	5,5
Talude inferior - Solos	0,57	13,1	5,0

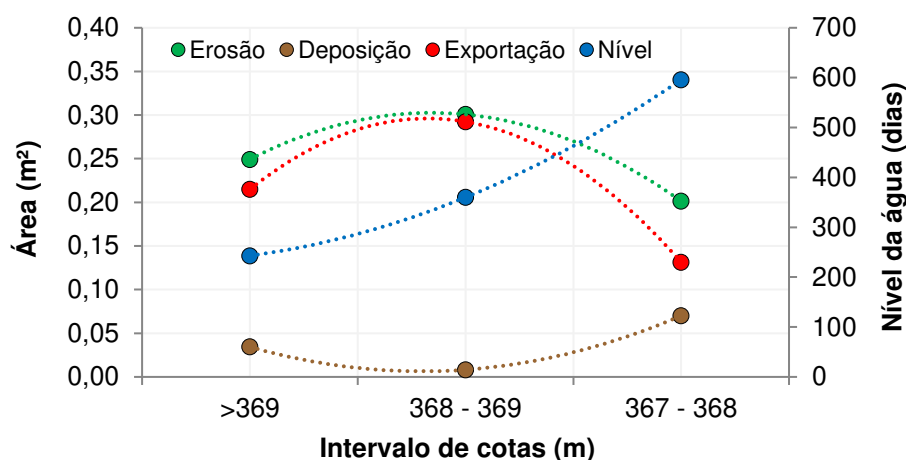
Fonte: O autor.

Ao diferenciar as seções entre as que possuem e não possuem blocos de rocha, depreende-se que os recuos (cm) no talude superior foram maiores nos taludes desprovidos de blocos de rocha. Os menores valores observados em taludes com blocos de rocha podem estar relacionados à maior rugosidade no talude inferior proporcionada pelos blocos, modificando a movimentação orbital das partículas de água e antecipando a rebentação das ondas quando o reservatório opera próximo das cotas máximas ou máxima. No entanto, os pontos com presença de blocos de rocha no talude inferior registraram recuos ligeiramente superiores em comparação aos pontos sem blocos de rocha. Neste último caso, um dos motivos pode ser o desenvolvimento diferencial de turbilhonamentos entre os blocos de rocha, contribuindo para erosões com magnitudes ligeiramente maiores. Outro motivo pode ser a maior inclinação média observada para taludes com blocos de rocha ( $16,8^\circ$ ) (Figura 37), o que pode ter efeito sobre o tipo de rebentação de onda na margem e na maior facilidade de arraste do material desagregado para dentro do reservatório

em comparação a taludes desprovidos de blocos de rocha e em média mais suaves (12,1°).

A Figura 41 e a Figura 42 descrevem os fenômenos erosivos observados nas seções topográficas compartimentadas em intervalos de cotas dos 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.

Figura 41 – Valores médios de área transversal (m<sup>2</sup>) de solo erodido, depositado e exportado da seção topográfica para diferentes intervalos de cotas dos 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.



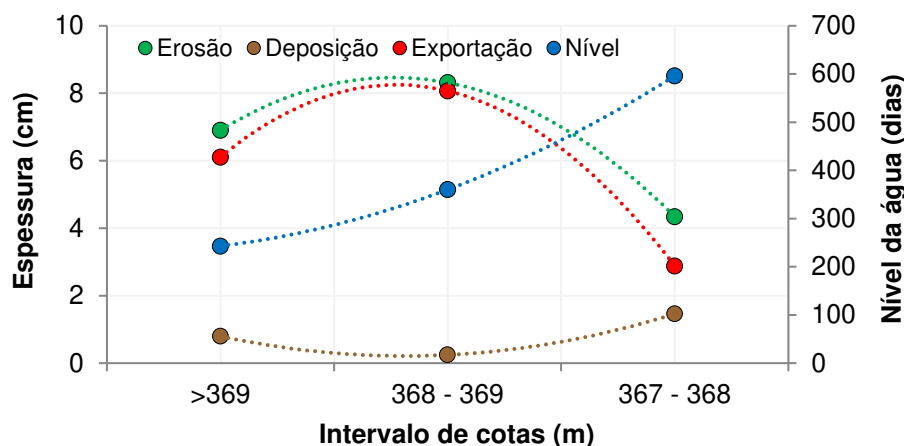
Fonte: O autor.

Os dados indicam que as maiores erosões e exportações médias de solo foram verificadas para o intervalo de cotas 368 – 369 m, cujo intervalo também verificou a menor quantidade de solo depositado. As menores erosões e exportações, bem como as maiores deposições de solo ocorreram no intervalo de cota 367 – 368 m. As porções do terreno acima da cota 369 m apresentaram valores intermediários de erosão, exportação e deposição de solo em comparação aos demais intervalos de cotas. Cabe salientar que o nível da água permaneceu por mais tempo entre as cotas 368 – 367 (596 dias – 49,7%), seguido das cotas 368 – 369 m (360 dias – 30%) e acima da cota 369 m (243 dias – 20,3%). O menor número de dias do nível em cotas maiores, especialmente acima da cota 369 m para o período considerado, se deve a um período de seca prolongada na bacia de contribuição, conforme apresentado na Figura 29. Devido a isso, o comportamento oscilatório neste período destoou do comportamento verificado para a série histórica completa de oscilações (Figura 28), em que o nível permaneceu por mais tempo em

cotas altas. Caso o nível tivesse permanecido por mais tempo em cotas mais altas (>369 m), provavelmente as erosões nestas cotas teriam sido maiores, aproximando-se dos dados apresentados na Figura 33 que considera a série histórica completa de oscilações e as erosões históricas acumuladas.

As áreas (m<sup>2</sup>) de solo erodido, depositado e exportado foram convertidas em espessuras médias (cm), de modo a facilitar a comparação de dados entre diferentes intervalos de cotas, conforme pode ser observado na Figura 42.

Figura 42 – Valores médios de espessura (cm) de solo erodido, depositado e exportado da seção topográfica para diferentes intervalos de cotas dos 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.



Fonte: O autor.

Para o período analisado, o nível do reservatório atingiu a cota máxima apenas no ano de 2018 e brevemente em 2019. Devido ao período de seca já em 2020, o nível atingiu brevemente neste ano o seu máximo de 369,56 em junho e de 369,29 em fevereiro de 2021. O fato de o nível não ter operado próximo da cota 370 m em dois dos quase quatro anos analisados explica parcialmente as menores erosões observadas acima da cota 369 m em comparação ao intervalo de cotas 368 – 369 m. Por outro lado, o reservatório operou em cotas altas durante 2018 e 2019 por tempo considerável, propiciando a produção de sedimentos e também o transporte do solo rompido e desestruturado já existente no pé do talude superior para cotas inferior (abaixo da cota 369 m). Nos anos de 2020 e 2021 em que o nível operou na maior parte do tempo em cotas inferior, estes sedimentos oriundos das cotas superiores nos anos anteriores pode ter-se depositado majoritariamente no intervalo de cota 367 – 368 m, conforme representado na Figura 42. Em relação às

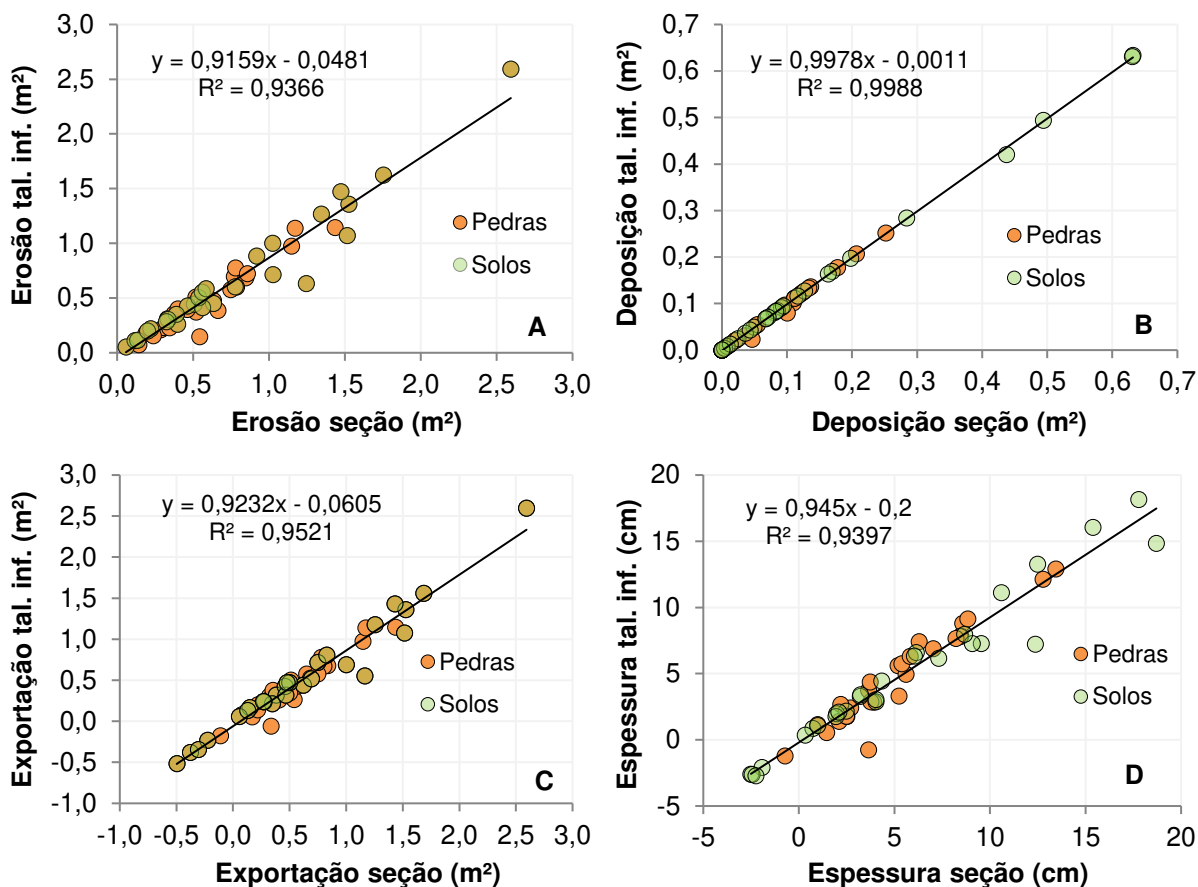
cotas acima de 369 m durante os anos de 2020 e 2021, como o nível do reservatório não atingiu neste período o pé do talude superior, pode ter-se depositado solo neste local oriundo de rompimentos de porções do talude superior em função de negatividades e solapamentos provocados pelas ondas durante os anos de 2018 e 2019, o que pode explicar as consideráveis deposições apresentadas na Figura 42.

Em todo caso, a espessura de solo depositada em cada intervalo de cotas é pequena em comparação à respectiva exportação de solo, principalmente para as cotas acima de 368 m. Nestes intervalos de cotas a quantidade de solo depositada é mínima em relação à erosão, o que indica que as porções superiores dos taludes transferem facilmente os sedimentos para porções inferiores potencializado por suas maiores inclinações. Por vezes é possível observar in loco o rolamento de blocos de solo oriundos do rompimento do talude superior para cotas inferiores dentro do reservatório, sequer sendo necessária a atuação da água e das ondas para transferência dos sedimentos.

Por fim, é interessante notar a rápida redução da quantidade de solo erodido e exportado, bem como o aumento de solo depositado no intervalo de cotas entre 367 – 368 m. Estes dados observados para um período curto (2018 – 2021) corroboram os dados apresentados na Figura 33 que indicam alteração mínima do terreno abaixo da cota 367 m, considerando erosões históricas acumuladas (2001 – 2021).

A Figura 43 ilustra a contribuição proporcional do talude inferior, em relação ao talude superior, na quantidade de solo erodido, depositado e exportado em relação ao total verificada na seção para os 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. A Figura 43A, B, C e D indicam que o talude inferior contribuiu, quantitativamente, com 83% da erosão, 99% da deposição, 78% da exportação e 91% da espessura média verificada na seção topográfica como um todo. A maior contribuição do talude inferior nestes quantitativos em relação ao talude superior está relacionado à maior permanência do nível em cotas mais baixas e abrangidas pelo talude inferior. Como as ondas atuam nas cotas em que o nível do reservatório opera, era de se esperar que esta porção da margem fosse a mais desgastada pela dinâmica lacustre no período considerado.

Figura 43 – Contribuição do talude inferior na quantidade parcial de: A - Solo erodido (m<sup>2</sup>); B – Depositado (m<sup>2</sup>); C – Exportado (m<sup>2</sup>) e D – Espessura (cm) em relação ao total verificado na seção para os 55 pontos monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.



Fonte: O autor.

#### 4.1.8 Geometria, fisionomia e erosões em áreas com blocos de rocha

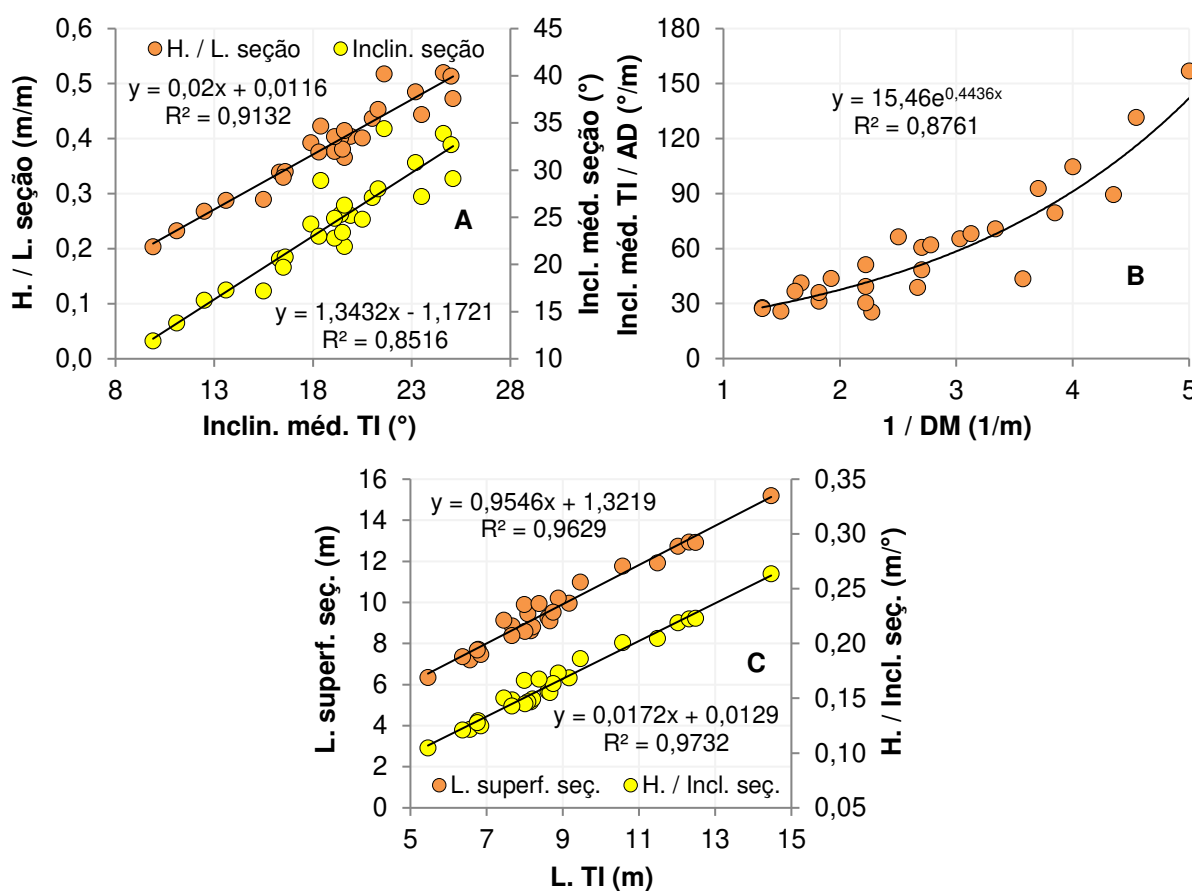
Nesta seção e na seção a seguir serão analisadas as relações entre as propriedades físicas dos solos, a geometria dos taludes e outras variáveis locais e os processos erosivos observados nas 55 seções topográficas entre janeiro de 2018 e agosto de 2021. A análise e apresentação dos dados foi realizada isolando-se pontos monitorados com blocos de rocha no talude inferior dos pontos sem blocos, uma vez que nem todas as relações obtidas para um grupo de dados puderam ser obtidas para o outro.

A Figura 44 apresenta as relações entre a geometria do talude inferior e da seção topográfica observadas para os 27 pontos monitorados com blocos de rocha.

A Figura 44A apresenta a relação entre a inclinação média do talude inferior (°) com a altura (H.) (m), comprimento (L.) (m) e inclinação média da seção (°). As

variáveis relativas à seção topográfica foram obtidas e seguem a mesma nomenclatura apresentada na Figura 18. Os dados indicam que quanto maior a inclinação média do talude inferior, maior é a relação altura e comprimento da seção, bem como a inclinação média da seção, e vice-versa.

Figura 44 – A – Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento (H./L.) (m/m) da seção topográfica e a inclinação média da seção (°). B - Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e o diâmetro máximo (DM) (m) e a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. C - Relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento da superfície da seção (m) e a relação altura/inclinação média da seção (m/°) nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados.



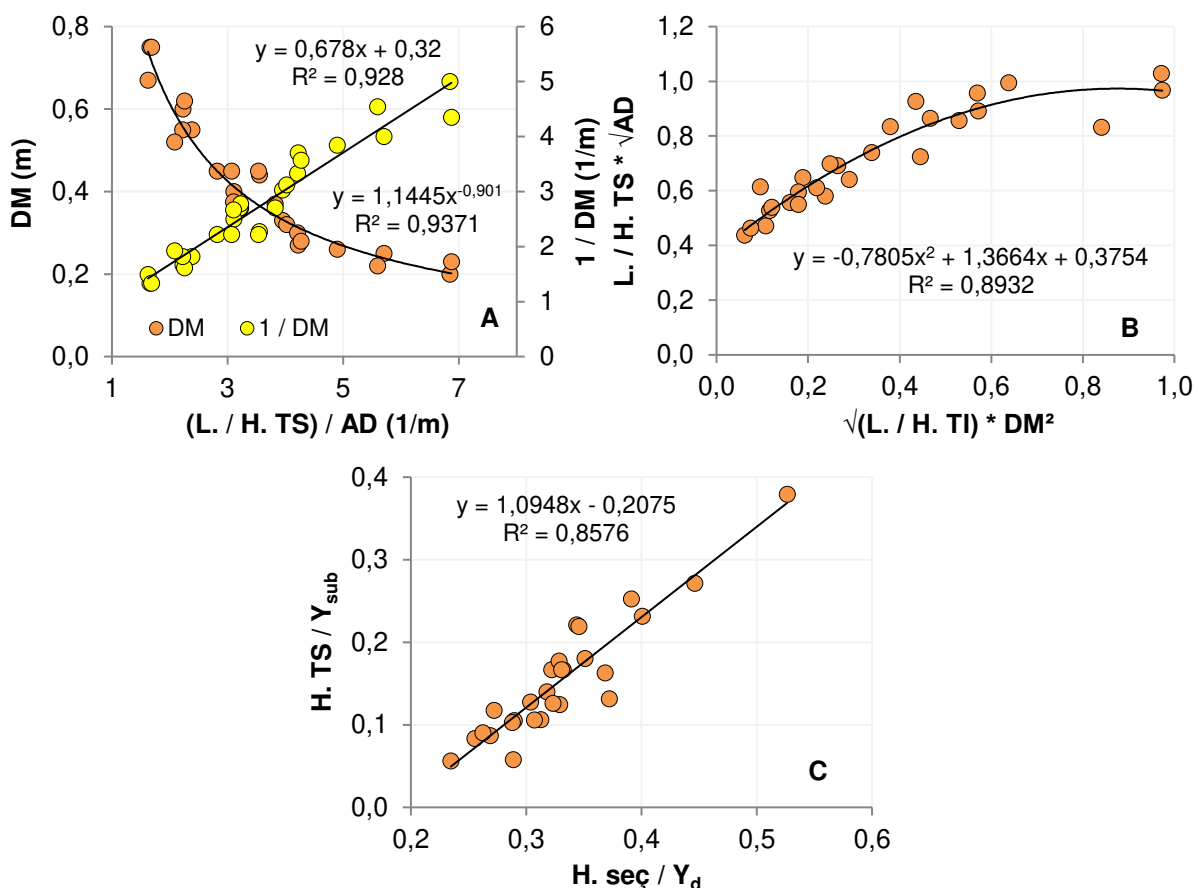
Fonte: O autor.

A Figura 44B apresenta a relação entre a inclinação média do talude inferior (°) e a amplitude diamétrica (AD) (m) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha encontrados nos pontos monitorados. Já a Figura 44C indica a relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento superficial da seção (m) e a relação altura e inclinação média da seção (m/°). Quanto maior o comprimento do

talude inferior, maior o comprimento superficial da seção e maior a relação altura e inclinação média da seção, e vice-versa.

A Figura 45A apresenta a relação entre o comprimento e altura do talude superior (L./H. TS) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha encontrados nos taludes. Quanto maior o diâmetro máximo e, conseqüentemente, a amplitude diamétrica, menor é a relação comprimento/altura do talude superior, ou seja, mais verticalizado este tende a ser, e vice-versa.

Figura 45 – A - Relação entre o comprimento e altura do talude superior (L./H. TS) com o diâmetro máximo (DM) (m) e a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. B - Relação entre o comprimento e altura do talude inferior (L./H. TI) combinado com o diâmetro máximo (DM) (m) e o comprimento e altura do talude superior (L./H. TS) combinado com a amplitude diamétrica (AD) (m) dos blocos de rocha no talude inferior. C – Relação entre a altura da seção (H. seç.) (m) combinado com peso específico aparente seco ( $Y_d$ ) (kN/m<sup>3</sup>) e a altura do talude superior (H. TS) (m) combinado com o peso específico submerso dos solos ( $Y_{sub}$ ) (kN/m<sup>3</sup>) nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados.



Fonte: O autor.

A Figura 45B apresenta relações existentes entre a geometria do talude superior e talude inferior (comprimento (L.) e altura (H.) (m)) considerando a amplitude diamétrica e o diâmetro máximo dos blocos de rocha encontrados nos

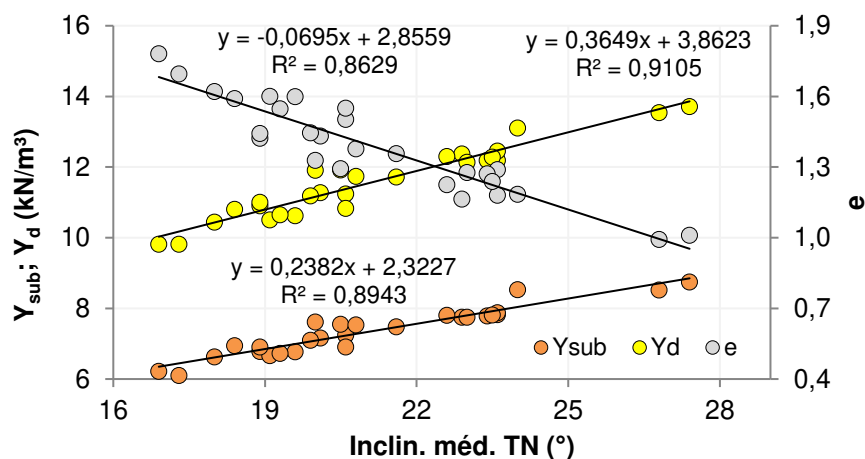


pontos monitorados. A relação indica que quanto maior o comprimento do talude inferior em relação à sua altura, ou seja, quanto mais suave o talude for, mais suave também será o talude superior. A Figura 45C indica a relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a altura média da seção topográfica (H. seq.) (m). A altura média do talude (1,11 m) superior representa aproximadamente 30% da altura média da seção (3,79 m).

As relações apresentadas acima possuem utilidade na estimativa de parâmetros geométricos para diferentes pontos no reservatório considerando trechos com presença de blocos de rocha no talude inferior, contribuindo para a descrição de feições e de faixas de terreno de interesse significativo quanto à magnitude dos processos erosivos.

A Figura 46 apresenta a relação entre a inclinação média do terreno natural (TN) ( $^{\circ}$ ) com o peso específico submerso ( $Y_{sub}$ ) e aparente seco ( $Y_d$ ) ( $\text{kN/m}^3$ ), bem como o índice de vazios ( $e$ ).

Figura 46 – Relação entre a inclinação média do terreno natural (TN) ( $^{\circ}$ ) e o peso específico submerso ( $Y_{sub}$ ) ( $\text{kN/m}^3$ ); o peso específico aparente seco ( $Y_d$ ) ( $\text{kN/m}^3$ ) e o índice de vazios ( $e$ ) dos solos nos 27 pontos com blocos de rocha monitorados.



Fonte: O autor.

Quanto maior os pesos específicos, menor é o índice de vazios, e vice-versa, dos solos encontrados nos locais monitorados com blocos de rocha. No entanto, o interessante de ser notado é a relação existente com a inclinação do talude natural. Quanto maiores os pesos específicos e menor o índice de vazios, maior é a inclinação do terreno natural, e vice-versa. Da mesma forma como para a geometria

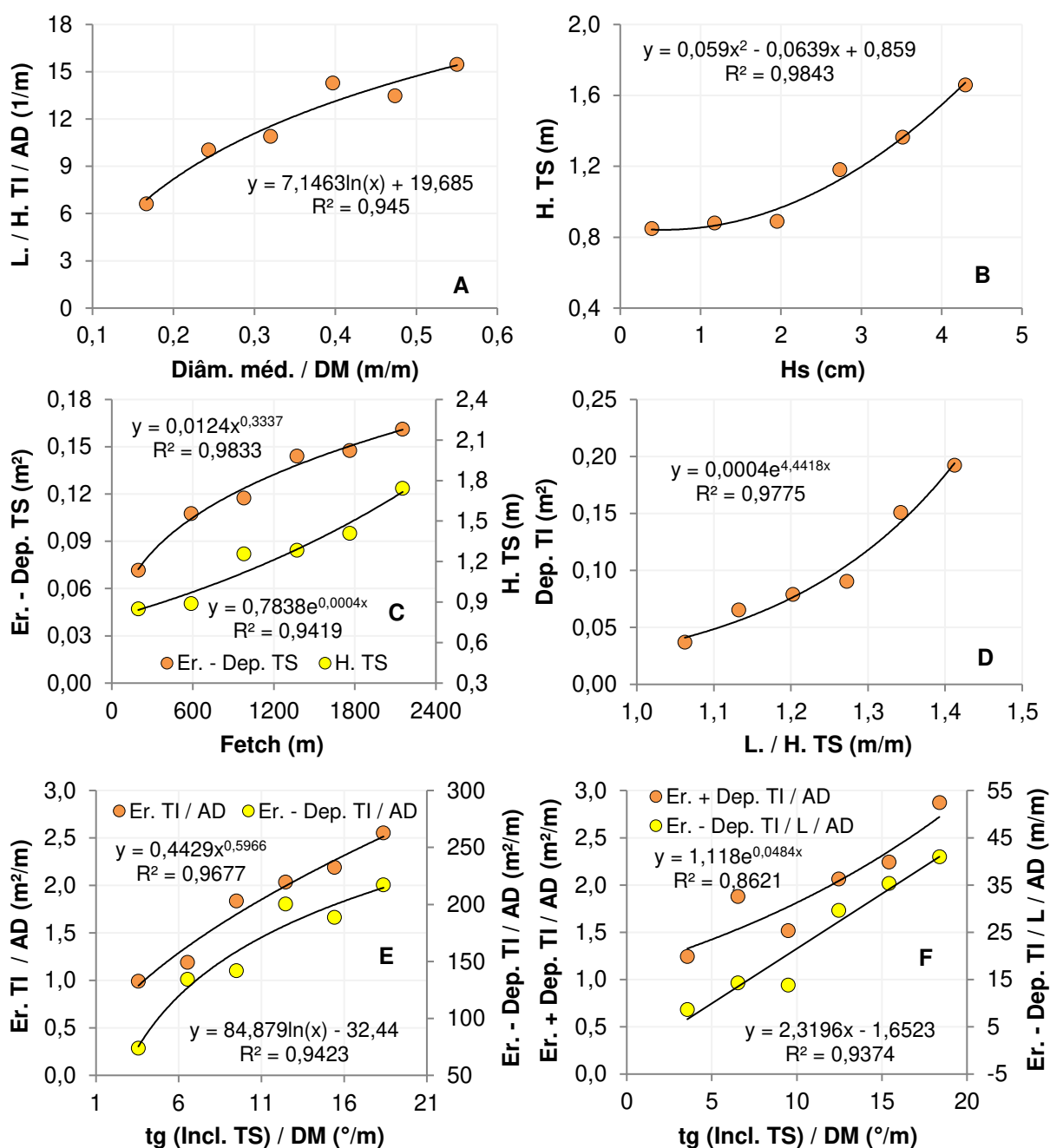
dos taludes superior e inferior, estas relações contribuem para compreender a conformação e geometria das encostas fora do reservatório nos pontos monitorados e como esta geometria se relaciona com os índices físicos do maciço. Cabe salientar que os dados não fazem distinção entre os diferentes usos do solo no terreno natural, nomeadamente vegetação arbórea secundária, capoeira ou pastagens e, portanto, as relações apresentadas são válidas independentemente dos usos de solo existentes, baseando-se somente na conformação do relevo.

A Figura 47A indica que quanto maior o diâmetro médio dos blocos de rocha encontrados no talude inferior, maior tende a ser o comprimento do talude inferior em relação a sua altura. Os dados mostram que taludes mais suaves tendem a apresentar blocos de rocha com diâmetros médios maiores em comparação à taludes mais inclinados. A Figura 47B apresenta a relação entre a altura significativa das ondas e a altura do talude superior. Quanto maior a altura das ondas, maior é a altura do talude superior resultante, e vice-versa. Cabe destacar que o efeito das ondas no talude superior só ocorre quando o nível do reservatório se encontra em cotas altas próximo da cota máxima, ou máxima. De forma similar, a Figura 47C apresenta a relação entre o fetch e a quantidade de solo exportada, bem como a altura do talude superior. Quanto maior o fetch, maior é a altura e a quantidade de solo exportada do talude superior, e vice-versa.

Quanto maior é o fetch, maior é a distância ininterrupta sobre o espelho da água em que o vento atua produzindo ondas e, portanto, tanto maiores também são as ondas resultantes. Quanto maior o fetch, maior é a energia cinética das ondas e maiores são as perdas de solo e a altura dos taludes quando estas se chocam contra os taludes verticalizados. Além disso, quanto maior a altura dos taludes, mais instáveis geotecnicamente eles tendem a ser, o que também pode contribuir para acelerar as perdas de solo independentemente da ação das ondas. Quanto mais altos e verticais os taludes forem, mais céleres são os recuos da margem (BANACH, 2006) e maior é a produção de sedimentos (KACZMAREK et al., 2016).

Alturas maiores resultam em maiores áreas expostas do talude, aumentando o efeito do impacto da chuva, do escoamento superficial e do vento na face.

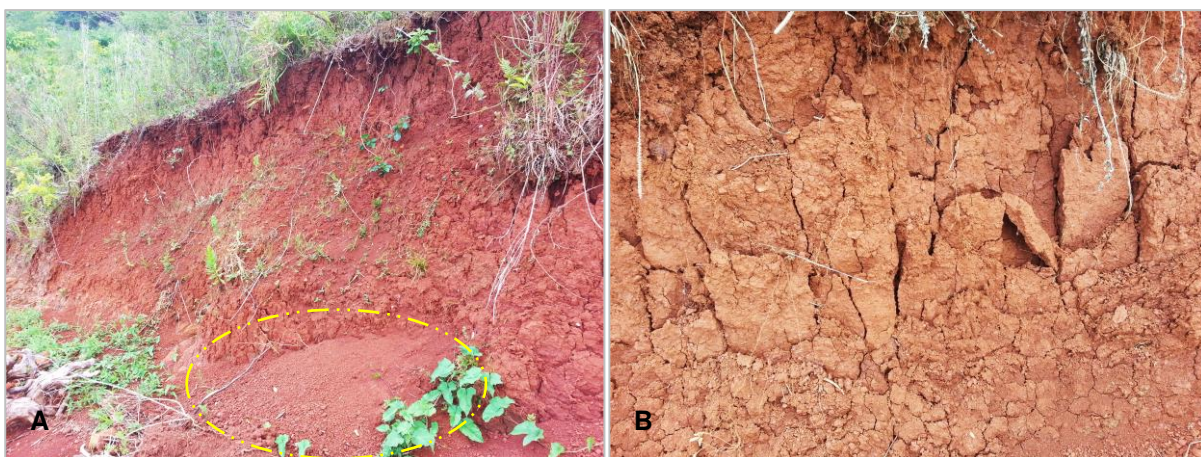
Figura 47 – A – Relação entre o diâmetro médio (m) e o comprimento (L.) (m) e altura (H.) (m) do talude inferior (TI) considerando diâmetro máximo (DM) (m) e amplitude diamétrica (AD) dos blocos de rocha. B – Relação entre a altura significativa de onda (Hs) (cm) e a altura (H.) (m) do talude superior (TS). C – Relação entre o fetch (m) e a quantidade de solo (Er. – Dep.) (m<sup>2</sup>) exportada do talude superior (TS) e a altura (H.) (m) do talude superior (TS). D – Relação entre a relação comprimento (L.) (m) e altura (H.) (m) do talude superior (TS) e a deposição de solo (Dep.) (m<sup>2</sup>) observada no talude inferior (TI). E – Relação entre a tangente da inclinação do talude superior (tg (Incl. TS)) (°) com a erosão (m<sup>2</sup>) no talude inferior (TI) e a quantidade de solo (Er. – Dep.) (m<sup>2</sup>) exportada do talude inferior (TI), considerando a amplitude diamétrica (AD) (m) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha. F - Relação entre a tangente da inclinação do talude superior (tg (Incl. TS)) (°) com a quantidade de solo mobilizada (Er. + Dep.) (m<sup>2</sup>) no talude inferior (TI) e a espessura média de solo exportada (Er. - Dep. / L.) (m<sup>2</sup>) no talude inferior (TI), considerando a amplitude diamétrica (AD) (m) e o diâmetro máximo (DM) (m) dos blocos de rocha.



Fonte: O autor.

Em taludes de solos argilosos com presença de argilas expansivas, quantidades expressivas de material podem se desprender da face do maciço após ciclos sucessivos de expansão e contração. Este efeito pode ser observado em inúmeros locais monitorados no reservatório da UHE Itá (Figura 48). Estes efeitos adversos combinados podem ter importância relevante na quantidade de perda de solo observado.

Figura 48 – A – Deposição de solo no pé do talude superior oriundo da desestruturação do maciço exposto à ação da chuva e do vento. B – Detalhe do rachamento e desprendimento de solo em placas no talude superior devido a ciclos sucessivos de expansão e contração do maciço argiloso.



Fonte: O autor.

A Figura 47D descreve a relação entre a geometria do talude superior e o quantitativo de deposição de solo observado no talude inferior. Os dados indicam que há um aumento de deposição de solo no talude inferior à medida que aumenta o comprimento do talude superior em relação à sua altura. Taludes com maiores comprimentos podem fornecer e aportar maiores quantidades de sedimentos ao talude inferior em comparação com taludes mais baixos, uma vez que estes possuem uma maior área exposta aos agentes erosivos, o que pode resultar numa maior produção de sedimentos. Cabe salientar que a face dos taludes superiores geralmente é desprovida de vegetação espontânea, permanecendo desprotegida e suscetível à ação dos agentes erosivos.

A Figura 47E e F descrevem de forma similar a relação entre a inclinação do talude superior e as quantidades de solo removido do talude inferior. Quanto maior a inclinação do talude superior, maior é a quantidade de solo erodido (Er.) e exportado (Er. – Dep.) do talude inferior, e vice-versa. Da mesma forma, quanto maior a

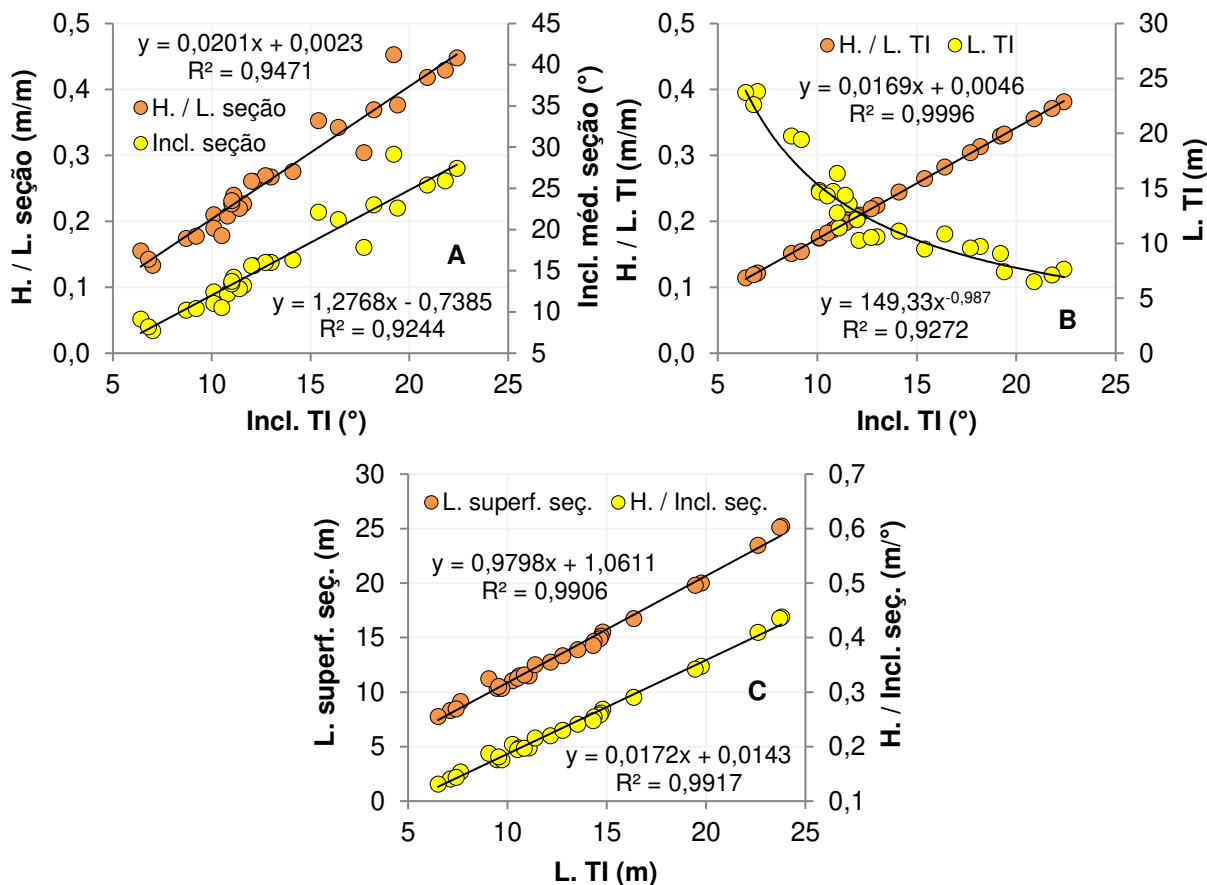
inclinação do talude superior, maior é a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep.) e maior é a espessura da camada de solo removido (Er. – Dep. / L.) do talude inferior. Quanto mais inclinado um talude for, mais instável geotecnicamente ele tende a ser, aumentando a probabilidade de rompimentos e produção de sedimentos (DURLO; SUTILI, 2014). Em margens de reservatórios, os sedimentos oriundos dos taludes superiores são depositados e transportados ao longo do talude inferior. Para os dados apresentados, as mobilizações e exportações de sedimentos no talude inferior são resultado do tempo de permanência do nível da água nas cotas abrangidas por esta porção do terreno, mas possivelmente também podem ser explicadas parcialmente pelo quantitativo de sedimentos oriundos dos taludes superiores e depositados nos taludes inferiores no período antes do início do monitoramento. Desta forma, parte da quantidade de solo removida do talude inferior durante o período avaliado pode se referir a sedimentos oriundos dos taludes superiores e que já haviam sido depositados no talude inferior. Os aportes nos taludes inferiores são maiores nos locais onde ocorrem taludes superiores mais inclinados e, porventura, mais altos, do que em taludes mais suaves e mais baixos.

#### **4.1.9 Geometria, fisionomia e erosões em áreas sem blocos de rocha**

Assim como para os dados apresentados acima para as áreas com blocos de rocha no talude inferior, serão apresentados a seguir algumas relações estabelecidas para pontos monitorados sem blocos de rocha considerando variáveis geométricas dos taludes, índices físicos dos solos, variáveis do reservatório e as suas relações com os processos erosivos observados nas seções topográficas. Os dados a serem apresentados se referem ao monitoramento de 28 pontos distribuídos ao longo de todo o reservatório monitorados entre janeiro de 2018 e agosto de 2021.

A Figura 49A apresenta a relação entre a inclinação média do talude inferior ( $^{\circ}$ ) com a altura (H.) (m), comprimento (L.) (m) e inclinação média da seção ( $^{\circ}$ ). As variáveis relativas às seções topográficas foram obtidas e seguem a mesma nomenclatura conforme apresentado na Figura 18.

Figura 49 – A – Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento (H./L.) (m/m) da seção topográfica e a inclinação média da seção (°). B - Relação entre a inclinação média do talude inferior (TI) (°) e a relação altura/comprimento do talude inferior (H./L. TI) (m/m) e o comprimento do talude inferior (L. TI) (m). C - Relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento da superfície da seção (m) e a relação altura/inclinação média da seção (m/°) nos 28 pontos sem blocos de rocha monitorados.



Fonte: O autor.

Os dados indicam que quanto maior a inclinação média do talude inferior, maior é a relação altura/comprimento da seção, bem como a inclinação média da seção, e vice-versa. Para o caso da UHE Itá, estes dados permitem determinar, a partir da inclinação média do talude inferior, a cota mínima de levantamento da seção dentro do reservatório, bem como o comprimento medido no terreno (talude superior e inferior) a partir da crista do talude superior com relevante interesse para os processos erosivos neste tipo de taludes (sem blocos de rocha). A Figura 49B apresenta a relação entre a inclinação média do talude inferior (°) e a relação altura/comprimento do talude inferior (H./L. TI) (m/m) e o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) dos pontos monitorados. Já a Figura 49C indica a relação entre o comprimento do talude inferior (L. TI) (m) e o comprimento superficial da seção (m) e a relação altura/inclinação média da seção (m/°) nos 28 pontos sem blocos de rocha monitorados.

a relação altura e inclinação média da seção ( $m/^\circ$ ). Quanto maior o comprimento do talude inferior, maior o comprimento superficial da seção e maior a relação altura e inclinação média da seção, e vice-versa.

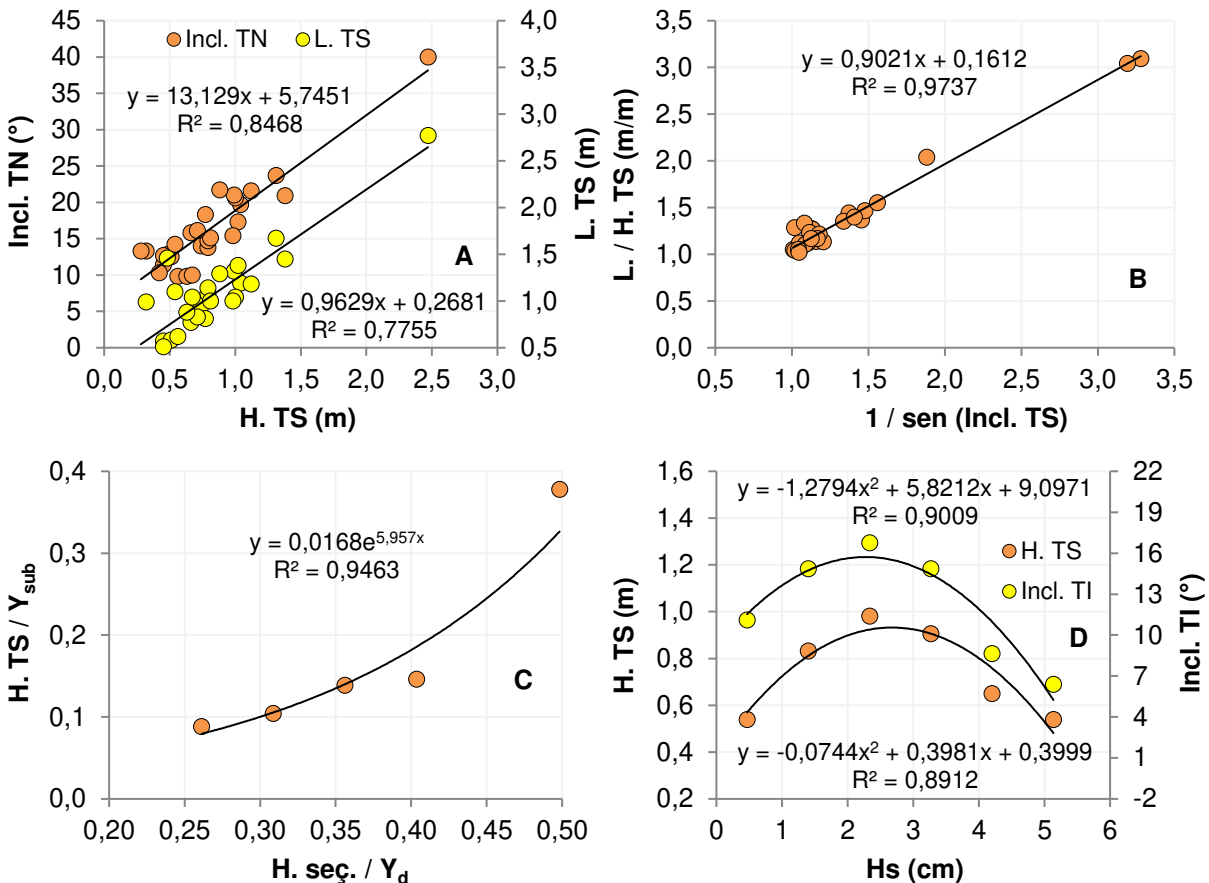
Assim como as relações apresentadas para os pontos com blocos de rocha na seção anterior, estas relações para pontos com apenas solo, em condições diversas de exposição, orientação, solitação e distribuição espacial, permitem delimitar a faixa de terreno em que os processos erosivos são mais atuantes, além de descrever geometricamente os taludes em que estes processos de maior interesse ocorrem.

A Figura 50 apresenta as relações entre a geometria do talude superior com a geometria do terreno natural, do talude inferior e da seção topográfica. A Figura 50A apresenta a relação entre a altura do talude superior ( $H. TS$ ) (m) e a inclinação do terreno natural (TN) ( $^\circ$ ) e o comprimento do talude superior ( $L. TS$ ) (m). Quanto maior a altura do talude superior, maior é a inclinação do terreno natural e maior o comprimento do talude superior, e vice-versa. Reid (1992) afirma que taludes altos só ocorrem em relevos com topografia acidentada. Considerando a realidade das margens do reservatório da UHE Itá que apresentam majoritariamente perfis de solo profundos (sem evidência de exposição da rocha alterada ou rocha mãe), é interessante analisar o efeito da inclinação do terreno natural sobre a altura do talude superior. Parece óbvio que para um mesmo recuo horizontal do talude superior, áreas do entorno do reservatório com inclinações maiores resultarão em taludes superiores mais altos do que terrenos com inclinações menores. No entanto, conforme apresentado na Figura 5, as erosões em margens de reservatórios também ocorrem no sentido vertical, podendo estes aprofundamentos verticais ocorrerem numa velocidade similar ao recuo horizontal, o que também contribui para o aumento da altura do talude superior. Em todo caso, a relação entre a altura do talude superior e o terreno natural é válida para margens com perfis profundos de solo sem exposição de material mais resistente (rocha alterada ou rocha mãe). Cabe destacar que esta relação não foi verificada para locais monitorados com presença de blocos de rocha, conforme apresentado na seção anterior.

A Figura 50B descreve a relação entre a inclinação do talude superior em função da relação comprimento/altura do talude superior ( $L./H. TS$ ) (m). A inclinação variou de  $18^\circ$  a  $83^\circ$ , a altura variou de 0,28 m a 2,47 m e o comprimento variou de

0,34 m a 2,77 m. A Figura 50C indica a relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a altura média da seção topográfica (H. seç.) (m). A altura média do talude superior (0,81 m) representa aproximadamente 23% da altura média da seção (3,50 m). Os pontos sem blocos de rocha apresentaram alturas médias menores dos taludes superiores e da seção comparadas às feições monitoradas nos pontos com blocos de rocha.

Figura 50 – Relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a inclinação do terreno natural (TN) (°) e o comprimento do talude superior (L. TS) (m). B – Relação entre a inclinação do talude superior (TS) e a relação comprimento/altura do talude superior (L./H. TS) (m). C - Relação entre a altura da seção (H. seç.) (m) combinado com peso específico seco aparente seco ( $Y_d$ ) (kN/m<sup>3</sup>) e a altura do talude superior (H. TS) (m) combinado com o peso específico submerso dos solos ( $Y_{sub}$ ) (kN/m<sup>3</sup>). D - Relação entre a altura significativa de onda (Hs) (cm) e a altura do talude superior (H. TS) (m) e a inclinação do talude inferior (TI) (°).



Fonte: O autor.

A Figura 50D apresenta as relações entre a altura significativa das ondas (Hs) (cm) e a altura do talude superior (H. TS) (m) e a inclinação média do talude inferior (°). A altura do talude superior e a inclinação do talude inferior aumentam até determinada altura de onda, havendo logo a seguir uma diminuição da altura do



talude superior e da inclinação do talude inferior com o aumento da altura da onda. A diminuição da inclinação do talude inferior e da altura do talude superior, apesar de submetidas às maiores ondas (e, portanto, fetchs), é condicionada provavelmente à topografia original do terreno natural. Os pontos com inclinações e alturas reduzidas estão localizados em relevo suave, resultando em taludes inferiores com inclinações também suaves. Devido a essa suavidade do talude inferior, o efeito das ondas na margem é minimizado, porque provavelmente predominam ondas do tipo deslizante que possuem menor energia cinética associada (Figura 6), o que por sua vez pode explicar alturas menores do talude superior mesmo expostos a fetchs grandes. Por outro lado, os pontos que apresentam alturas do talude superior e inclinações do talude inferior maiores ou ascendentes com o aumento da altura das ondas (e do fetch) estão localizados em relevo naturalmente mais declivoso. Estes argumentos reforçam a importância da geometria da encosta natural dentro do reservatório sobre as feições resultantes nas margens, ou seja, apesar do aumento do fetch e da altura das ondas, a reduzida inclinação do talude inferior contribui para amenização dos efeitos adversos que estas ondas poderiam causar nas margens. Cyberski (1973) e Reid (1992) relacionam o comprimento do fetch e o distanciamento do ponto em relação ao barramento com a gravidade dos processos erosivos atuantes nas margens, de modo que quanto maior o fetch e mais próximo do barramento (águas mais profundas), maiores tendem a ser as magnitudes das erosões. No entanto, esta análise não leva em consideração a influência de outros parâmetros como as características do relevo original, as quais, aparentemente, também exercem grande influência sobre os processos erosivos observados nas margens nas primeiras décadas de operação do empreendimento.

Fernandez & Fulfaro (2000), Formiga et al. (2017) e Lawson (1985) afirmam a inclinação das novas margens é alta na faixa de oscilação da água quando da implantação de um reservatório. Esta inclinação é reduzida via solapamento e movimentação de sedimentos até atingir seu equilíbrio dinâmico, resultando em margens geralmente mais suaves que a geometria original. Na presente discussão, os pontos submetidos a fetchs grandes, mas localizados em relevo suave, necessitam de menos alteração da geometria original para atingir o novo equilíbrio. Segundo Reid (1992), quanto mais suaves e largas as plataformas de abrasão forem

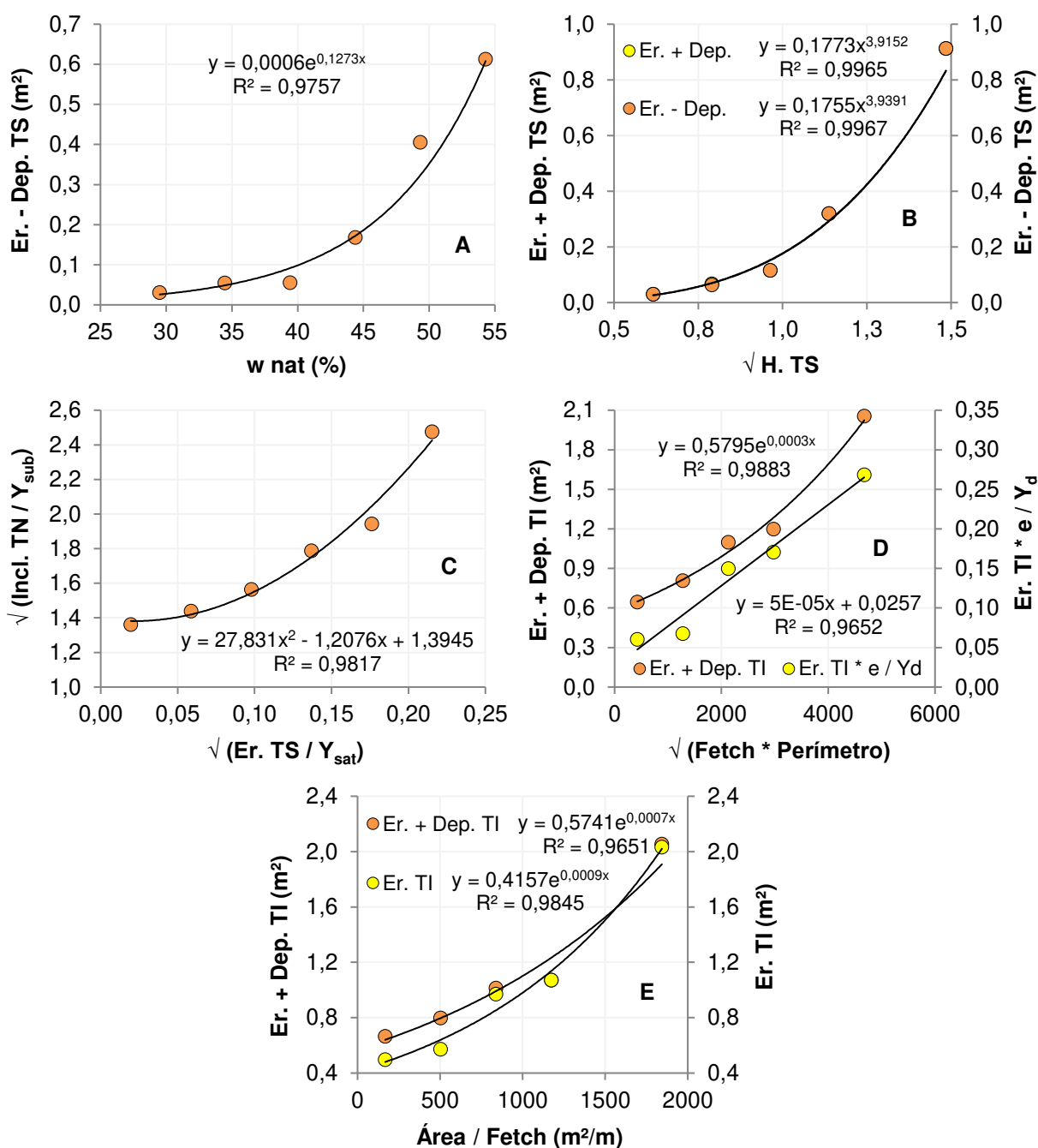
(talude inferior), maior será a dissipação de energia cinética das ondas antes que estas atinjam o pé do talude.

Cabe salientar que nesta pesquisa foram analisados locais com solos predominantemente argilosos a muito argilosos, podendo os comportamentos aqui apresentados não serem verificados para solos de constituição arenosa/siltosa, mesmo com inclinações suaves do talude inferior. Taludes de reservatórios de constituição predominantemente arenosa ou fino-siltosa são facilmente erodidos, sendo os solos arenosos os mais suscetíveis (CYBERSKI, 1973). Os solos argilosos, por sua vez, são menos suscetíveis à erosão devido às forças coesivas existentes entre partículas (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

A Figura 51 apresenta relações entre o quantitativo de erosões e deposições verificadas no talude superior e inferior e a geometria dos taludes, variáveis do reservatório e índices físicos dos solos. A Figura 51A apresenta a relação entre a umidade natural do solo ( $w_{nat}$ ) (%) e a quantidade de solo exportada do talude superior ( $Er. - Dep. TS$ ) ( $m^2$ ). Quanto maior a umidade do maciço, maior é a quantidade de solo exportada do talude superior, e vice-versa.

Quando o solo se apresenta úmido, as partículas constituintes encontram-se hidratadas e ligadas por forças eletrostáticas mais frágeis devido à maior distância entre partículas, o que diminui a resistência do material. Para os dados apresentados, a quantidade de solo exportada do talude superior aumenta rapidamente a partir de 40 – 45% de umidade do solo, sendo, portanto, a umidade um fator importante na evolução dos processos erosivos. Umidades elevadas ou saturação do solo está diretamente associado ao nível de operação do reservatório. Quando o nível do reservatório se encontra na cota máxima ou próximo dela, a umidade do maciço é alta que, associado à verticalidade e altura dos taludes superiores, potencializa as perdas de solo e a evolução das erosões nas margens. Bao et al. (2015b) também observaram que a umidade do maciço foi fator determinante para o desenvolvimento de colapsos de solo nas margens. Para a condição do hemisfério norte, Elliot (1991) e Reid (1992) observaram que taludes orientados para o norte apresentaram maiores umidades devido à menor exposição solar do que taludes orientados para o sul, e que esta maior umidade resultou em maiores depósitos de solo na base do talude.

Figura 51 – A – Relação entre a umidade natural do solo ( $w_{nat}$ ) (%) e a quantidade de solo exportada do talude superior (Er. – Dep. TS) ( $m^2$ ). B – Relação entre a altura do talude superior (H. TS) (m) e a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TS) ( $m^2$ ) e exportado (Er. - Dep. TS) ( $m^2$ ) do talude superior. C – Relação entre a erosão no talude superior (Er. TS) ( $m^2$ ) e a inclinação do terreno natural (TN) ( $^\circ$ ). D – Relação entre o fetch e perímetro na margem ( $m \cdot m$ ) e a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TI) ( $m^2$ ) e erodido (Er. TI) ( $m^2$ ) no talude inferior. O perímetro é um conceito elaborado pelo autor desta pesquisa e representa o perímetro de margem na margem oposta ao ponto em análise resultante da projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch, conforme método descrito em NRCS (2014). E – Relação entre a área e fetch com a quantidade de solo mobilizado (Er. + Dep. TI) ( $m^2$ ) e erodido (Er. TI) ( $m^2$ ) no talude inferior. A área é um conceito elaborado pelo autor desta pesquisa e representa a área superficial do espelho d'água abrangida pela projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch, conforme método descrito em NRCS (2014).



Fonte: O autor.

A Figura 51B complementa estes dados, pois à medida que a altura do talude superior aumenta, aumenta exponencialmente a quantidade de solo exportada do talude superior (Er. – Dep. TS) ( $m^2$ ), e vice-versa. Como a deposição de solo no talude superior é insignificante, a curva que descreve a mobilização de solo no talude superior (Er. + Dep. TS) ( $m^2$ ) é praticamente coincidente. Portanto, quanto maior a altura e a umidade do talude superior, maior será a quantidade de solo removida, e vice-versa.

Da mesma forma, quanto maior a inclinação do terreno natural, maior é a altura do talude superior (Figura 50A) e maior é a perda de solo (Figura 51C). Autores como Casado et al. (2002) e Thorne & Tovey (1981) afirmam que a altura do talude está diretamente relacionada com o volume de material erodido. Reid (1992) afirma que taludes com mais de 9,0 m de altura podem apresentar 3 vezes mais solo depositado em sua base quando comparados a taludes com alturas entre 4,5 m e 9,0 m.

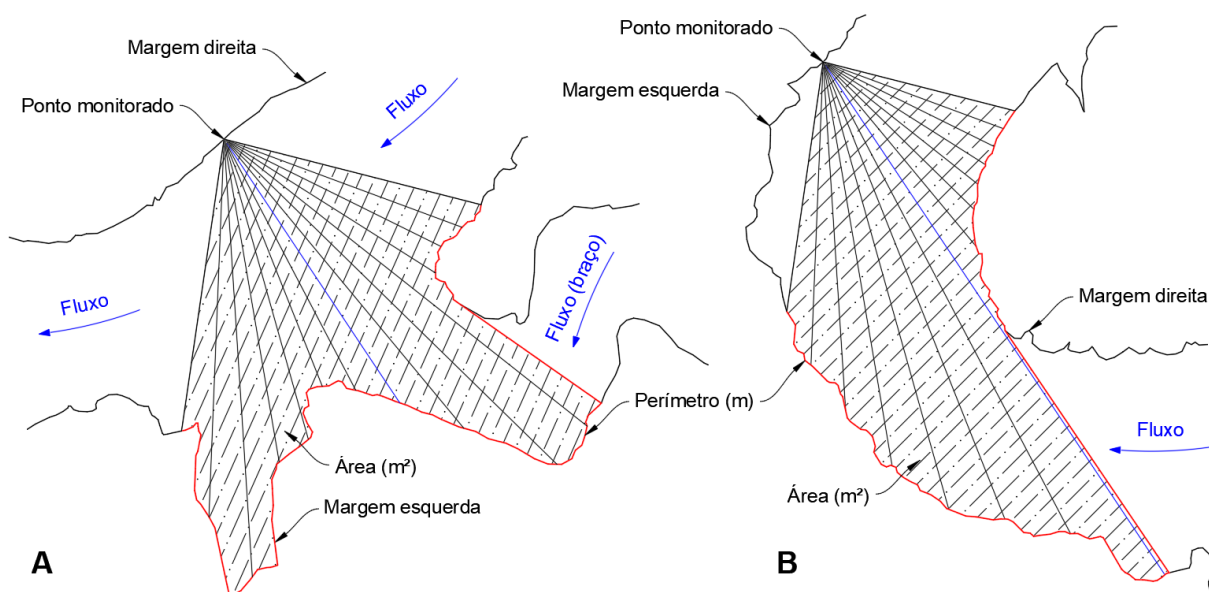
A Figura 51D indica que quanto maior o fetch (m) e o perímetro (m), maior é a mobilização de solo no talude inferior (Er. + Dep. TI) ( $m^2$ ) e maior a erosão no talude inferior (Er. TI) ( $m^2$ ), e vice-versa. De forma similar, a Figura 51E apresenta a mobilização (Er. + Dep. TI) ( $m^2$ ) e a erosão (Er. TI) ( $m^2$ ) de solo no talude inferior em função da relação área ( $m^2$ ) e fetch (m). O perímetro (Figura 51D) é um conceito elaborado pelo autor desta pesquisa e representa o perímetro de margem na margem oposta ao ponto em análise resultante da projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch. A área (Figura 51E) é um conceito elaborado pelo autor desta pesquisa e representa a área superficial do espelho d'água abrangida pela projeção das linhas em diferentes ângulos para determinação do fetch. O fetch foi determinado conforme metodologia descrita em NRCS (2014). A representação esquemática destas duas variáveis (perímetro e área) está apresentada na Figura 52.

Nos dados apresentados na Figura 51E pode-se observar que a quantidade de deposição de solo no talude inferior é expressiva para relações de área/fetch da ordem de 500 - 600. Para relações acima deste valor, a deposição é mínima ou desprezível em relação à erosão. Os pontos monitorados com relação área/fetch acima de 500 – 600 são caracterizados por estarem localizados em pontos de maiores larguras do reservatório com margens opostas muito recortadas (Figura 52A), ou expostos a um fetch orientado no sentido diagonal do eixo do reservatório,

o que aumenta a área e o fetch e favorece a movimentação lateral de sedimentos na margem devido ao impacto tangencial das ondas (Figura 52B).

Para a realidade da UHE Itá, o perímetro do reservatório é bastante recortado e está associado geralmente a vales encaixados e declivosos. Esta conformação de encostas contribui para o confinamento e o aumento da velocidade do vento encosta abaixo que, ao atingir e soprar sobre a superfície da água, potencializa a formação de ondas com maiores alturas e energias cinéticas. Estas ondas, ao atingirem as margens opostas do reservatório em relação ao sentido do fluxo do vento, tendem a provocar maiores erosões comparado a reservatórios localizados em relevo suave ou levemente ondulado (SU et al., 2017). Para os dados apresentados, quanto maior o fetch e ou a área superficial do reservatório sobre a qual o vento atua, maior tende a ser a mobilização e remoção de solo do talude inferior e menor a deposição.

Figura 52 – A - Representação esquemática de pontos de monitoramento expostos a fetchs e áreas grandes devido às grandes larguras do reservatório e margem oposta recortada. B - Pontos em monitoramento expostos a fetchs orientados no sentido diagonal do eixo do reservatório.



Fonte: O autor.

Além da conformação das encostas, a incidência tangencial das ondas em relação à margem pode ocasionar o transporte lateral de sedimentos, tornando as análises de perda de solo ainda mais complexas. Ao invés dos sedimentos serem transferidos para cotas inferiores dentro do reservatório, este tipo de fenômeno transfere os sedimentos lateralmente na margem antes de serem arrastados para

maiores profundidades. Devido à dificuldade de observação, é difícil averiguar o impacto desta dinâmica no montante de solo erodido nas margens submetidas a esta condição (CYBERSKI, 1973).

## 4.2 EFICÁCIA TÉCNICA DAS INTERVENÇÕES

As técnicas a serem avaliadas quanto à sua eficácia no controle de processos erosivos foram executadas em quatro trechos, nomeadamente ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21, conforme arranjos construtivos apresentados na Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23. Os trechos foram escolhidos considerando a criticidades dos processos erosivos em relação aos demais trechos cadastrados com erosão.

O objetivo principal da execução de técnicas em diversos arranjos construtivos foi testar o seu desempenho frente às solicitações impostas pela dinâmica lacustre, de forma a selecionar as técnicas e arranjos que apresentassem melhor desempenho. A partir das análises também foi possível ajustar os arranjos construtivos testados, de modo a aumentar o desempenho das intervenções que não atingiram desempenho satisfatório. Por fim, também foram obtidas informações sobre técnicas, materiais construtivos e métodos que não devem ser utilizados em intervenções em reservatórios.

A eficácia técnica das intervenções foi avaliada considerando a **integridade** física da estrutura, o **efeito** técnico na margem proporcionado pela estrutura e o **desenvolvimento vegetativo** associado ao arranjo construtivo como um todo. Para cada nível de avaliação qualitativa foram definidas quatro categorias de pontuação para classificação do desempenho das intervenções a partir de análise visual em campo ao longo do tempo. As categorias definidas com suas respectivas descrições podem ser observadas no Apêndice A.

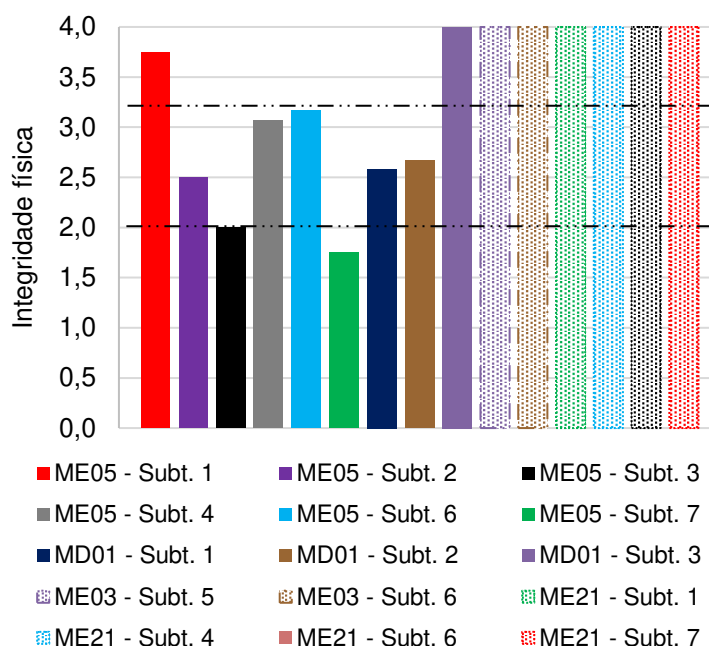
### 4.2.1 Integridade da técnica

A integridade física das estruturas é um dos principais aspectos a serem verificados na avaliação da eficácia de intervenções. Isto se deve porque a integridade física influencia diretamente os efeitos técnicos proporcionados pelas intervenções tais como retenção de sedimentos e restos de material orgânico,

dissipação de energia cinética das ondas, estabilidade do solo, manutenção de umidade e suporte físico para o desenvolvimento das plantas.

A Figura 53 apresenta o desempenho das intervenções avaliadas quanto à sua integridade física.

Figura 53 – Integridade física das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução.



Fonte: O autor.

Cabe salientar que as intervenções denominadas siltação viva, defletores vivos, feixes vivos, plantio em linhas e em quadrículas no subtrecho ME 05 foram consideradas e pontuadas como sendo estruturas propriamente ditas, já que estas intervenções não foram combinadas com materiais inertes (pedra, biorretentores, madeira, por exemplo). Na Figura 53 também pode-se observar a definição de limites (linhas pretas pontilhadas) para determinação da necessidade de manutenção ou reexecução das intervenções. Para intervenções em margens de reservatórios, considerou-se como limite máximo de falha de 20% (3,2) em que manutenções não se fazem necessárias. Entre 20,1% (3,1) e 50% (2,0) é necessária a realização de manutenções para correção de falhas construtivas ou estruturais. Para falhas estruturais acima de 50% (<2,0) deve-se reexecutar a intervenção, de

modo que os efeitos técnicos e o desenvolvimento vegetativo possam ser atingidos satisfatória ou plenamente.

A Figura 53 mostra que os piores desempenhos de integridade física foram observados nos subtrechos 3 e 7 do trecho ME 05, seguido do subtrecho 2. Nestes subtrechos foram executadas técnicas como siltação viva, feixes e defletores vivos. Estas técnicas dependem da propagação vegetativa das espécies vegetais utilizadas para o sucesso das intervenções que, para o caso em questão, demonstrou ser um método com desempenho insatisfatório para a propagação das plantas. Um dos motivos do baixo desempenho estrutural das técnicas foi a incapacidade de propagação vegetativa das plantas ocasionado pela combinação de vários fatores. Um dos fatores observados foi a reduzida capacidade de propagação dos ramos e estacas, fator inerente à biologia das espécies utilizadas, apesar das técnicas terem sido executadas no período de repouso vegetativo e das espécies utilizadas terem capacidade de propagação vegetativa comprovada. Outro fator reside nos longos períodos de submersão do material vegetal logo após implantação. A submersão total temporária ou prolongada devido à dinâmica de oscilação do reservatório pode ter reduzido a quantidade de luminosidade e oxigênio necessários ao início da propagação vegetativa, resultando na morte do material vegetal implantado e conseqüentemente da integridade física das estruturas, conforme resultado observado na Figura 54A. A parte do material vegetal que apresentou propagação vegetativa foi atacada por formigas cortadeiras em algumas situações, mesmo com a execução dos tratamentos silviculturais adequados antes e durante a execução da obra. Isto resultou no retardo do estabelecimento vegetativo e inclusive morte do material vegetal após sucessivos ataques.

Os subtrechos 4 e 6 do trecho ME 05, plantios em linhas e quadrículas, respectivamente, apresentaram desempenho superior aos subtrechos descritos anteriores porque foram executados com mudas propagadas previamente em viveiro via seminal ou vegetativa. O emprego de mudas ao invés de material vegetal (propagação vegetativa) para o tratamento de margens de reservatórios mostrou-se mais efetivo porque a velocidade de estabelecimento das plantas foi muito superior. O rápido estabelecimento das mudas no campo permitiu crescimento acelerado, de modo que as plantas apresentassem alturas acima da cota máxima do reservatório poucos meses após o plantio, sendo o seu desenvolvimento não prejudicado pela elevação e permanência do nível da água em cotas altas durante o período de



cheia. De modo geral, essa submersão parcial temporária ou prolongada aparentemente estimulou ainda mais o desenvolvimento vegetativo devido à ausência de restrições de umidade do solo. No entanto, a integridade física dos plantios em linha e quadrícula nos subtrechos 4 e 6 não é adequada, havendo necessidade de manutenções, devido à competição ocasionada por gramíneas invasoras (subtrecho 4) (Figura 54B) e fragilidade projetual das quadrículas nas cotas mais baixas (subtrecho 6), resultando em arranquio/escavo de mudas pelas ondas (Figura 54C).

No caso do subtrecho 4, o ingresso de espécies invasoras na porção intervencionada ocorreu devido à estabilidade do ambiente gerado pelas próprias intervenções. Anteriormente à obra, a colonização espontânea do talude inferior dentro do reservatório por espécies invasoras estava limitada devido ao efeito das ondas e da oscilação do nível da água. Com a intervenção, condições propícias foram geradas pela implantação das técnicas como aumento da estruturação do solo pelas raízes das plantas, aumento da rugosidade da margem conferido pela parte aérea das plantas e consequente retenção de restos orgânicos. Esta nova condição da margem permitiu o avanço das espécies invasoras para dentro do reservatório.

A melhoria da integridade física para estes subtrechos pode ser alcançada por meio do controle das espécies invasoras, as quais estão a sufocar parte das mudas plantadas e prejudicando o seu pleno estabelecimento. Caso seja necessário, parte das mudas perdidas podem ser repostas por meio de plantio de manutenção. Tão importante quanto a implantação das técnicas são as medidas de manutenção após execução da obra para o alcance pleno dos objetivos do projeto. Brancalion et al. (2015) comentam que um dos maiores motivos para o insucesso de projetos de recuperação de áreas degradadas é a negligência de medidas de manutenção para correção de falhas executivas ou de desvios da trajetória de restauração em relação aos objetivos almejados. Muitas vezes o projeto de restauração está adequadamente delineado, no entanto, a ausência de manutenção impede que os objetivos técnicos propostos sejam alcançados sequer minimamente.

Os subtrechos 1 e 2 do trecho MD 01, linhas de biorretentores e enrocamento vivo, respectivamente, também apresentaram desempenho abaixo do esperado em relação à integridade física. O subtrecho 1 apresenta taludes com solos pouco agregados e bastante suscetíveis à erosão, resultando na danificação severa da

linha inferior de biorretentores. Em alguns pontos a estrutura foi completamente removida pela dinâmica do reservatório. No subtrecho 2 muitos blocos de rocha foram movimentados devido à maior inclinação dos taludes e ao efeito das ondas e da oscilação da água, afetando a integridade plena das estruturas.

Figura 54 – A – Desenvolvimento vegetativo reduzido ou inexistente em intervenções baseadas em propagação vegetativa. B – Competição entre espécies gramíneas invasoras e espécies autóctones implantadas em linhas de plantio. C – Remoção de mudas e exposição de sistemas radiciais em cotas inferiores da técnica de plantio em quadrícula. D – Exposição da face do biorretentor devido à erosão de solo e aprofundamento do talude inferior pelo embate de ondas e oscilação do nível da água.



Fonte: O autor.

No subtrecho 1 (ME 05) e 3 (MD 01) as linhas de biorretentores combinados com mudas apresentaram desempenho adequado quanto à integridade física, exceto a linha inferior de biorretentores em ambos os subtrechos. Esta linha teve sua face severamente exposta pelo embate de ondas combinado com o efeito de oscilação do nível nos anos após execução. Estes danos já eram esperados em parte, pois esta estrutura serve como primeira linha de proteção da margem e,

portanto, está mais suscetível e exposta à dinâmica lacustre e à perda de estabilidade (Figura 54D).

A partir das experiências projetuais acumuladas com as intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram projetadas as soluções construtivas para os trechos ME 03 e ME 21. Neste segundo projeto foram previstas soluções construtivas mais robustas através do uso de madeira e sistemas de fixação mais profundos para as estruturas inertes (paliçadas, biorretentores, etc). O resultado destas estruturas mais robustas nos trechos ME 03 e ME 21 pode ser observado na Figura 53, as quais apresentaram pontuação máxima para a integridade física. Estruturas mais robustas permitem efeitos técnicos e suporte estrutural ao desenvolvimento vegetativo mais efetivos, proporcionando uma taxa de sucesso maior das intervenções no conjunto do arranjo construtivo, conforme veremos adiante.

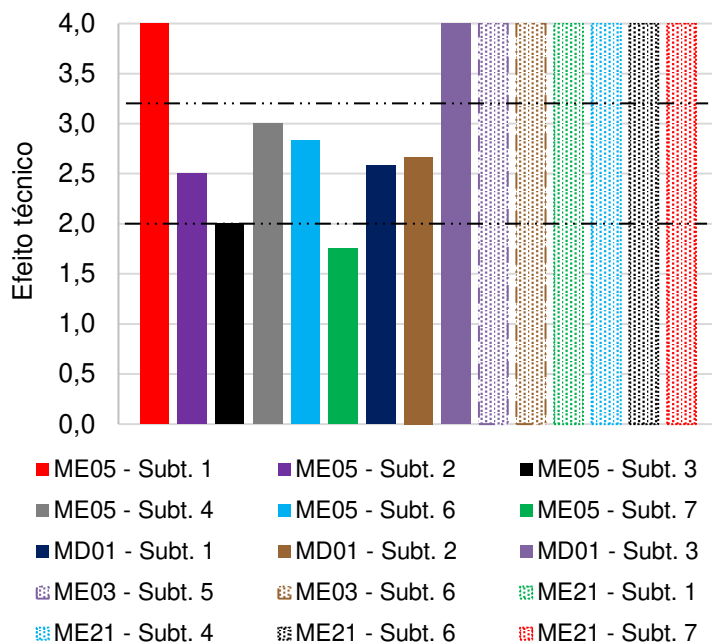
#### **4.2.2 Efeito da técnica**

Os efeitos técnicos almejados com a implantação de intervenções de Engenharia Natural em margens de reservatórios são a retenção de sedimentos e materiais orgânicos (galhos, troncos, plantas aquáticas, entre outros); conservação da umidade do solo e suporte físico para favorecimento do desenvolvimento das plantas; contribuição para a dissipação da energia cinética das ondas; viabilização de condições ambientais favoráveis à regeneração natural na faixa de intervenção e estruturação e proteção superficial do solo. A manifestação do efeito técnico almejado geralmente está relacionada com a integridade física das estruturas, sejam elas inertes (materiais construtivos inertes) ou vivas (materiais construtivos vivos). Desta forma, quando a estrutura mantém sua integridade, o efeito técnico é alcançado, podendo ser parcial ou plenamente. A Figura 55 apresenta o desempenho das intervenções avaliadas quanto ao seu efeito técnico.

Assim como apresentado na Figura 53, a Figura 55 demonstra que o pior desempenho quanto ao efeito técnico foi observado para o subtrecho 7, seguido do subtrecho 3 e 2 do trecho ME 05. Conforme comentado anteriormente, as técnicas implantadas nestes subtrechos basearam-se total ou majoritariamente no princípio da propagação vegetativa das plantas utilizadas, cujo método de propagação não se mostrou apropriado considerando a dinâmica lacustre. Como as plantas não

conseguiram propagar-se satisfatoriamente em campo, ou sequer se propagaram, as estruturas físicas falharam, bem como o efeito técnico esperado.

Figura 55 – Efeito técnico das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução.



Fonte: O autor.

Para os demais subtrechos do trecho ME 05 e MD 01 localizados na faixa de manutenção (2,0 – 3,2), os efeitos alcançados pelas intervenções não foram satisfatórios pela combinação de fatores como falhas executivas, falhas na alocação das linhas de intervenção, ataques severos de formigas em várias ocasiões, colonização agressiva de espécies gramíneas invasoras e intensa ação das ondas. Estes fatores adversos não foram observados necessariamente em todos os subtrechos e trechos.

Para o subtrecho 1 (ME 05), subtrecho 3 (MD 01) e trechos ME 03 e ME 21 o efeito técnico alcançado pelas intervenções foram excelentes, conforme apresentado na Figura 55. As intervenções proporcionaram o controle dos processos erosivos, a manutenção de perfis de compensação entre linhas longitudinais sucessivas de intervenção, a retenção de restos orgânicos nas entre linhas, a estabilidade do solo para promoção do recobrimento superficial pelas espécies herbáceas implantadas e a regeneração natural de espécies autóctones

não previstas em projeto em alguns subtrechos. Alguns detalhes destes efeitos observados em campo são apresentados na Figura 56.

Figura 56 – A – Manutenção de perfil de compensação entre linhas longitudinais sucessivas de intervenção. B – Deposição de restos orgânicos na margem após ciclo de elevação e depleção do nível de operação do reservatório. C – Estabilidade da superfície do solo para desenvolvimento e recobrimento superficial por espécies herbáceas autóctones previstas em projeto. D – Deposição de sedimentos oriundos do talude superior no tardo de linha de plantio adensado de mudas.



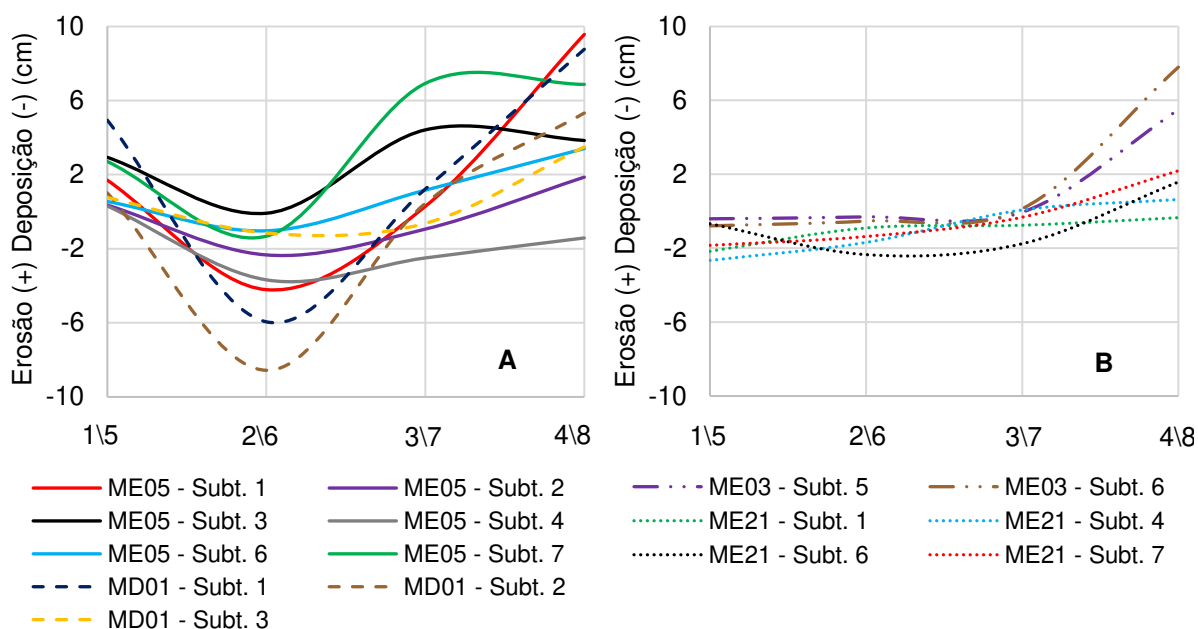
Fonte: O autor.

Estes efeitos positivos decorrentes das técnicas implantadas nas margens proporcionam benefícios que induzem a dissipação de energia cinética das ondas, o reforço superficial e em profundidade do solo pelas raízes e parte aérea das plantas (herbáceas + arbustivas) e o aporte de material orgânico que favorecerá o desenvolvimento das plantas no longo prazo à medida que o material depositado for se decompondo e liberando nutrientes. O aporte de material orgânico na margem costuma ocorrer em todo ciclo de elevação e depleção do nível da água, contribuindo para a nutrição das espécies implantadas em obra no longo prazo, o

que é especialmente interessante em margens de reservatórios devido à perda dos horizontes superiores do perfil do solo pelos agentes erosivos.

A verificação quantitativa do efeito técnico proporcionado pelas intervenções no que concerne o controle dos processos erosivos na margem foi realizada por meio de pinos de erosão. Os pinos avaliados são os mesmos utilizados para materialização das parcelas de medição de plantas no campo. Os resultados apresentados na Figura 57 correspondem à espessura média anual (cm) da camada de solo erodida (+) ou depositada (-) nas diferentes posições na margem (Figura 24) para as diferentes técnicas executadas nos respectivos subtrechos e trechos. Os pinos 1 e 5 foram instalados na face do talude superior, os pinos 2 e 6 no pé do talude superior, os pinos 3 e 7 na porção intermediária da largura da faixa intervencionada e os pinos 4 e 8 fora da faixa intervencionada em cotas inferiores. Estes últimos foram instalados nesta posição para comparar o aprofundamento do talude inferior em local sem e com intervenção.

Figura 57 – A e B – Espessura média anual (cm) da camada de solo erodida (+) ou deposição (-) no talude superior (1\5) e talude inferior (2\6; 3\7; 4\8) nos diferentes subtrechos intervencionados com diferentes técnicas e arranjos construtivos.



Fonte: O autor.

Ao comparar a Figura 57A e B pode-se observar uma maior amplitude dos dados (erosão e deposição) nos subtrechos dos trechos ME 05 e MD 01 (primeiro projeto) em comparação aos subtrechos dos trechos ME 03 e ME 21 (segundo

projeto). O subtrecho 1 (MD 01) apresentou a maior quantidade de erosão na face do talude superior dentre todos os subtrechos avaliados. Isto se deve porque este subtrecho apresentou os taludes mais altos de todos os subtrechos avaliados, denotando maior evolução histórica e apresentando maior área superficial de talude exposta. Conforme já apresentado na Figura 51, quanto maior a altura do talude superior, maior é o quantitativo de solo erodido. Apesar do subtrecho 1 (MD 01) ter sido intervencionado, esta intervenção não foi possível na face do talude superior devido à altura e elevada inclinação, mas apenas no talude inferior, permanecendo o talude superior exposto e sujeito aos agentes erosivos e confirmando os resultados já encontrados para os trechos monitorados sem intervenção (Figura 51).

O solo oriundo do talude superior geralmente permaneceu depositado no pé do talude superior (pinos 2 e 6) (Figura 57A) na zona de influência da primeira linha de intervenção no talude inferior. As maiores deposições foram observadas nos subtrechos 2 (enrocamento) e 1 (biorretentores) (MD 01), seguido do trecho 1 (ME 05) (biorretentores). Os menores quantitativos de deposição no pé do talude superior foram observados nos subtrechos 3 e 7 (ME 05) que receberam técnicas baseadas em propagação vegetativa das plantas. Como a propagação vegetativa não se mostrou uma técnica de propagação de plantas adequada para a dinâmica lacustre, a integridade física e os efeitos técnicos não foram satisfatórios, o que pode estar relacionado ao menor quantitativo de solo depositado nestes subtrechos, pois estes sedimentos provavelmente foram removidos pelas ondas. Na posição intermediária da faixa de intervenção (pinos 3 e 7), estes mesmos trechos foram os que apresentaram as maiores perdas de solo no talude inferior provavelmente pelos mesmos motivos apresentados acima. A ausência de estruturas para dissipação da energia das ondas e aumento da estruturação do solo tornaram os taludes inferiores nos subtrechos 3 e 7 (ME 05) altamente suscetíveis às solicitações impostas pela dinâmica lacustre.

Os demais subtrechos intervencionados nos trechos ME 05 e MD 01 apresentaram pouco aprofundamento do talude inferior, havendo inclusive aporte de sedimentos em alguns subtrechos. Os subtrechos 4 e 2 apresentaram os maiores aportes de sedimentos na porção intermediária de intervenção, decorrente provavelmente da baixa inclinação do talude inferior e desenvolvimento vigoroso de espécies gramíneas invasoras que estruturaram eficientemente a superfície do solo

(subtrecho 4) e uma linha densa de vegetação servindo de dissipador da energia das ondas e retendo sedimentos em seu tardoz (subtrecho 2).

Analisando a Figura 57B pode-se observar uma menor amplitude dos quantitativos de solo erodido e depositados nos taludes superior e inferior intervencionados em comparação aos subtrechos apresentados na Figura 57A. Os dados demonstram que não houve erosão na faixa intervencionada, apenas deposição de material especialmente restos orgânicos aportados pelo reservatório em momentos de nível elevado da água. Este cenário se deve à projeção de estruturas inertes mais robustas e que proporcionassem não só o controle da erosão, como também a retenção de sedimentos e/ou restos vegetais transportados pelo reservatório. Fica evidente com estes dados a melhoria do desempenho das intervenções implantadas nos trechos ME 03 e ME 21, as quais foram selecionadas e otimizadas considerando a experiência acumulada com as intervenções nos trechos ME 05 e MD 01.

Ao analisar os pinos de erosão 4 e 8 na Figura 57, pode-se observar uma tendência de aumento do aprofundamento do talude inferior com exceção de alguns subtrechos. Os pinos 4 e 8 estão localizados externamente à última linha de intervenção e refletem a suscetibilidade da porção não intervencionada da margem em relação às solicitações lacustres. Em margens não intervencionadas dentro da faixa de oscilação do nível da água ocorre o retrabalho de sedimentos oriundos de cotas superiores ao longo do talude inferior. Desta forma, geralmente há uma camada de solo desestruturado com espessura variável a depender da cota depositada no talude inferior e que é retrabalhada à medida que o nível do reservatório oscila no longo prazo. Ao intervencionar margens de reservatórios e interromper este fluxo de sedimentos de cotas superiores para cotas inferiores, a dinâmica lacustre modifica o seu comportamento erosivo e redireciona as solicitações para as porções desprotegidas da margem, de modo a manter a produção de sedimentos. Portanto, é provável que a porção desprotegida do talude inferior (sem intervenção) sofra um aprofundamento mais acelerado já que a faixa de terreno onde os sedimentos são produzidos é diminuída devido à implantação de técnicas de controle de erosões.

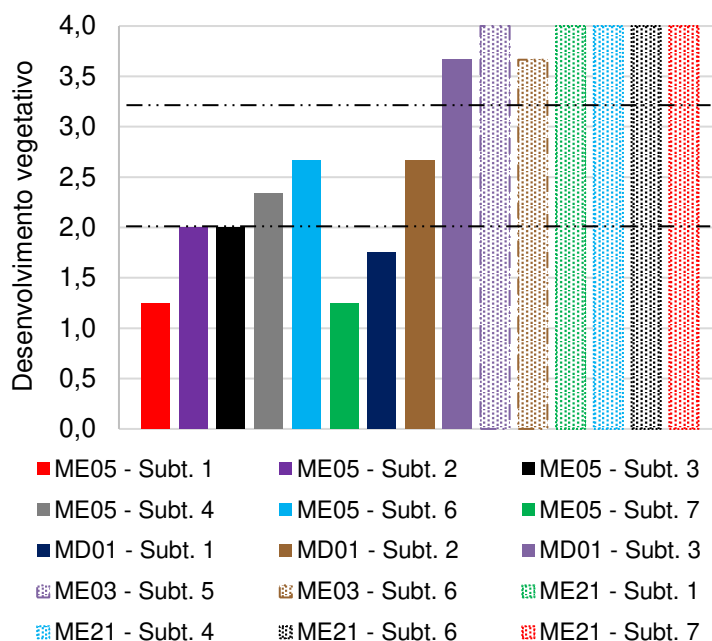


### 4.2.3 Desenvolvimento vegetativo

O sucesso de intervenções de engenharia natural, sejam elas executadas em ambientes fluviais ou lacustres, depende do pleno estabelecimento e desenvolvimento das plantas previstas em projeto. Desta forma, é imprescindível a avaliação desta componente construtiva nos locais intervencionados para averiguar a necessidade de manutenções ou reexecuções das soluções construtivas. O desenvolvimento da vegetação no campo é ainda mais importante quando esta é implantada como sendo a estrutura física em si, como nas técnicas de siltação viva, esteira viva, feixe vivo, defletor vivo e plantios em geral.

A Figura 58 apresenta a pontuação obtida para o desenvolvimento vegetativo nas diferentes técnicas implantadas nos trechos intervencionados. A avaliação da vegetação não considerou apenas a vitalidade e o desenvolvimento das plantas, mas também a densidade de plantas em relação ao inicialmente previsto em projeto.

Figura 58 – Desenvolvimento vegetativo das plantas nas intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução.



Fonte: O autor.

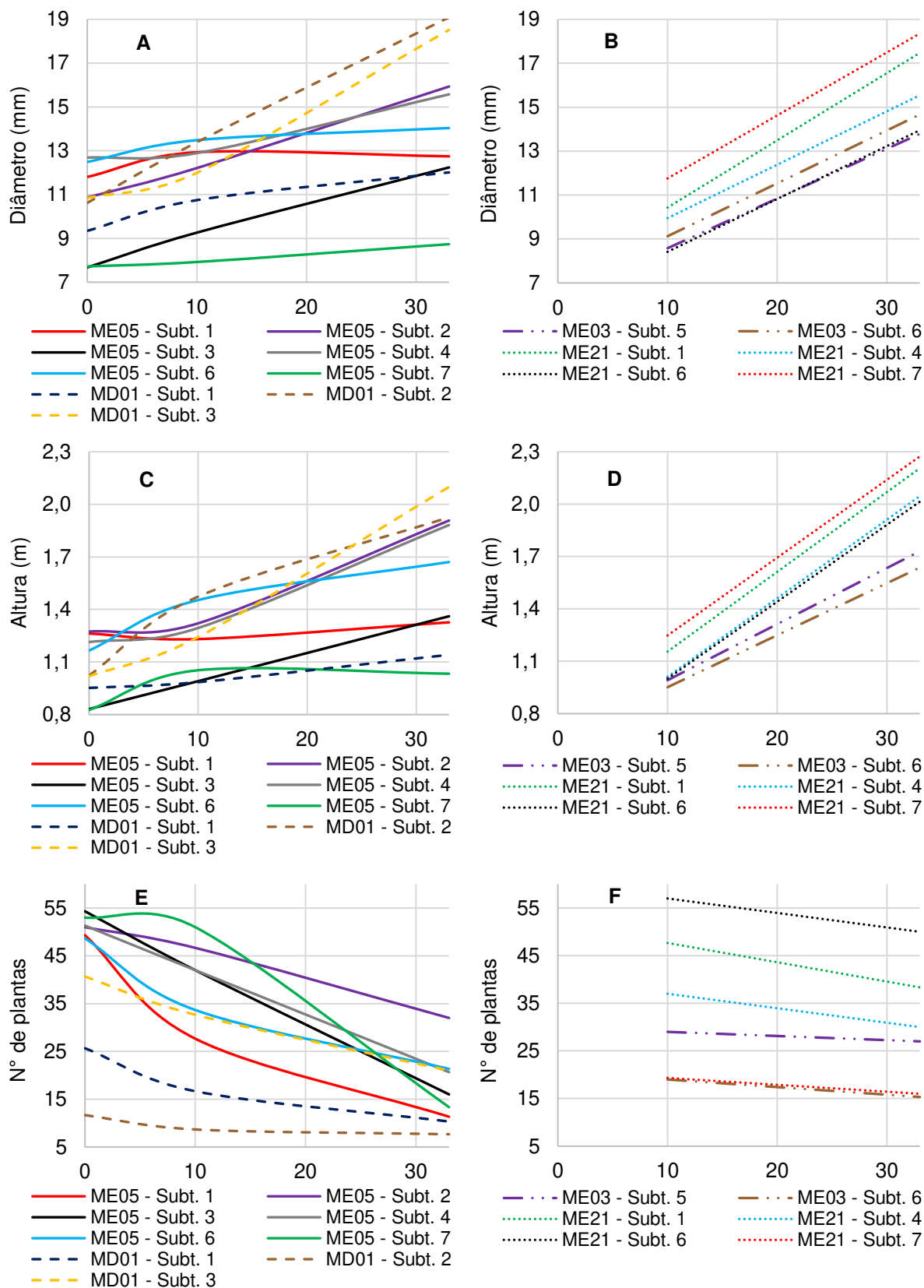
Os resultados apresentados na Figura 58 demonstram que o desenvolvimento vegetativo e a densidade de plantas nos trechos ME 05 e MD 01 foram

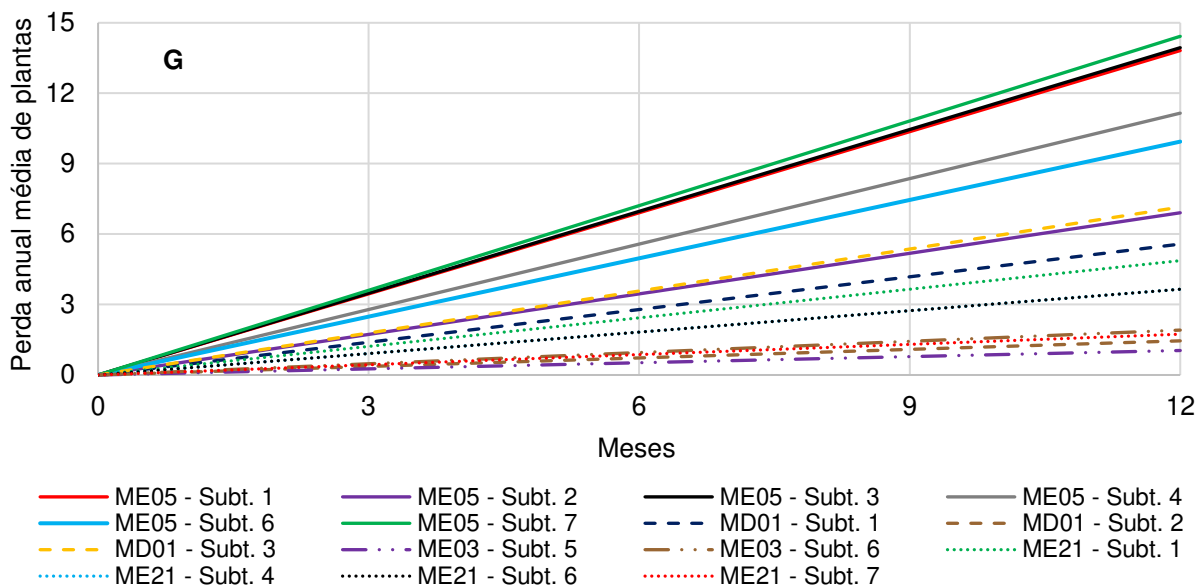
insatisfatórios, havendo necessidade de manutenção (plantios) ou reexecução de técnicas. A exceção é o subtrecho 3 (MD 01), cujo desenvolvimento vegetativo e densidade de plantas está de acordo com o projetado. Já os subtrechos ME 03 e ME 21 apresentaram desenvolvimento excelente da vegetação implantada com pontuação máxima para a maioria dos subtrechos, exceto o subtrecho 6 (ME 03).

O subtrecho 1 (ME 05) apresentou pontuação reduzida por causa de ataques severos de formigas cortadeiras, apesar do controle prévio e durante a execução da obra. Estes ataques acarretaram na morte de plantas e reduziram a densidade de plantas nas linhas de biorretentores executadas (Figura 59E e G). Os ataques de formigas ocorreram após a conclusão da obra e nos meses seguintes, prejudicando também o desenvolvimento médio do plantio em diâmetro e altura (Figura 59A e C). Ademais, este subtrecho concentrou grande quantidade de plantas das espécies *Sesbania virgata* (Cav.) Pers. e *Mimosa pigra* L., das quais grande parte morreu no primeiro ou segundo período vegetativo. Segundo Dutra (2009), grande parte dos táxons de *Mimosa* é anual, o que pode explicar em parte a morte de grande quantidade de indivíduos desta espécie no período avaliado. Em todo caso, a morte de indivíduos destas espécies está provavelmente mais relacionada ao ataque de formigas cortadeiras do que ao hábito vegetativo. A elevação da pontuação deste subtrecho poderia ser alcançada mediante novo plantio de mudas e controle efetivo de formigas nas áreas lindeiras, caso ainda se façam presentes.

O subtrecho 2 (ME 05) apresentou pontuação reduzida porque duas das três linhas de siltação viva foram executadas com material vegetal (estacas dos ramos) coletado de indivíduos adultos nas margens do reservatório e em seus rios tributários. No entanto, e como já discutido anteriormente, a propagação vegetativa deste material não foi satisfatória, resultando na falha destas duas linhas de plantio. A linha de siltação localizada na cota mais baixa dentro do reservatório foi executada com mudas previamente propagadas em viveiro e, por isso, apresentou pontuação máxima devido ao desenvolvimento vigoroso das mudas e densidade de plantio adequada.

Figura 59 – A e B – Diâmetro médio (mm). C e D – Altura média (m). E e F – Número médio de plantas por parcela das espécies vegetais arbustivas implantadas em cada subtrecho de intervenção. O eixo das abscissas corresponde aos meses de desenvolvimento vegetativo (0 a 33). As campanhas de monitoramento do desenvolvimento vegetativo ocorrem aos 0 meses, 10 meses e 33 meses. G – Perda anual média de plantas por parcela para as diferentes técnicas executadas nos subtrechos.





Fonte: O autor.

A Figura 59A e C apresenta o ótimo desempenho desta linha de plantio quanto ao diâmetro e altura das plantas no longo prazo. Mesmo assim, a pontuação geral para o subtrecho permaneceu distante do esperado devido a falha nas duas outras linhas de siltação viva. A elevação da pontuação deste subtrecho poderia ser alcançada mediante plantio de mudas nas linhas falhas.

O subtrecho 3 (ME 05) foi alvo da instalação de defletores vivos transversalmente ao sentido da linha da margem e que foram executados com ramos inteiros de espécies com capacidade de propagação vegetativa. No entanto, o desenvolvimento vegetativo do material foi insatisfatório com a emissão de brotos com dimensões e vigor reduzidos, resultando em pontuação reduzida e distante do esperado. O quantitativo inicial de brotos emitidos pelos ramos foi alto, mas houve uma forte redução nos meses seguintes após o término da execução da obra (Figura 59E e G). Os brotos remanescentes apresentaram ritmo de desenvolvimento satisfatório em diâmetro e altura (Figura 59A e C), mas distante do desenvolvimento apresentado pelas mesmas espécies implantadas por meio de mudas previamente propagadas em viveiro. Apesar do mecanismo de propagação vegetativa de plantas proporcionar redução de custos de obras em relação à propagação das mesmas espécies via seminal, o seu emprego no reservatório não se justificou porque o desenvolvimento vegetativo e os resultados técnicos obtidos foram insatisfatórios em comparação aos subtrechos onde foi executado plantio de mudas.

No subtrecho 4 (ME 05) foram implantadas linhas de plantio de mudas no talude inferior com baixa inclinação localizado em baía. O plantio apresentou desenvolvimento vigoroso tanto em diâmetro e altura (Figura 59A e C), no entanto, sofreu forte redução do número de indivíduos especialmente pela competição com espécies gramíneas invasoras (Figura 59E e G). Estas espécies gramíneas existiam nas proximidades da margem antes da obra e migraram rapidamente para dentro do reservatório após a implantação das técnicas. A presença de várias linhas de plantio dentro do reservatório serviu de proteção física e estrutura de apoio contra a dinâmica lacustre, o que favoreceu a migração e o desenvolvimento vigoroso das espécies gramíneas entre linhas plantadas. As recomendações técnicas para elevação da pontuação do subtrecho são o controle das espécies invasoras e o reforço do plantio de mudas das espécies autóctones previstas em projeto para elevar a densidade de plantas nas linhas.

O plantio de mudas em quadrícula implantado no subtrecho 6 (ME 05) apresentou desenvolvimento vegetativo satisfatório (Figura 59A e C), mas sofreu forte redução do número de indivíduos por parcela especialmente nos primeiros meses após o término da obra (Figura 59E e G). Esta redução se deu em função da escavação e remoção de mudas inteiras na porção inferior da técnica mais suscetível à ação das ondas. Nos primeiros meses após implantação, as mudas apresentavam reduzido desenvolvimento vegetativo devido ao pouco tempo dispendido para tal, o que contribuiu para uma maior remoção de indivíduos na faixa intervencionada. A implantação da técnica unicamente via plantio de mudas, sem auxílio de estruturas inertes de proteção e suporte, resultou na perda de mudas e redução do número de indivíduos. No projeto seguinte (trecho ME 21) foi projetada uma paliçada dupla em madeira na base do plantio para impedir a perda de mudas e favorecer o seu desenvolvimento. Esta medida mostrou-se muito efetiva, resultando em significativos ganhos técnicos, como veremos mais adiante.

O subtrecho 7 (ME 05) apresentou o pior desempenho quanto ao desenvolvimento vegetativo e número de plantas por parcela entre todos os subtrechos e técnicas avaliadas (Figura 59A, C, E e G). Os feixes vivos e a siltação viva executados neste subtrecho apresentaram pouca emissão de brotos, dos quais grande parte morreu poucos meses depois devido à incapacidade do material vegetal de se propagar plenamente. Em grandes faixas de terreno sequer foi

possível identificar as linhas de implantação das técnicas, pois a degradação do material vegetal permitiu às ondas a completa remoção das estruturas. Conforme já discutido acima, os resultados obtidos para as técnicas que dependem de propagação vegetativa das plantas serviram de base para a exclusão destas soluções construtivas do conjunto de soluções projetadas para as intervenções seguintes nos trechos ME 03 e ME 21.

O subtrecho 1 (MD 01) também apresentou desenvolvimento vegetativo inferior ao esperado (Figura 59A, C e E). O desempenho incipiente se deve a múltiplos ataques de formigas cortadeiras em porções do subtrecho nos primeiros meses após a implantação da obra e falhas projetuais de alocação das linhas de intervenção. As falhas projetuais permitiram a remoção de indivíduos nos meses iniciais após o plantio entre linhas sucessivas de intervenção, já que as estruturas inertes não conferiram suporte físico a todas as mudas. Em uma porção do subtrecho houve remoção de linhas de biorretentores vegetados pelas ondas devido a falhas de fixação, removendo também as plantas adjacentes às estruturas e prejudicando o desenvolvimento das remanescentes. O ataque de formigas cortadeiras resultou na perda de área fotossintética sucessivas vezes, retardando o desenvolvimento vegetativo ou inclusive levando indivíduos à morte. As experiências obtidas com as técnicas neste subtrecho resultaram no reforço estrutural das intervenções no projeto subsequente e no plantio entre linhas de estruturas inertes somente em caso destas estruturas apresentarem efeito físico protetor das mudas, de modo que a dinâmica lacustre não as conseguisse remover do talude.

No subtrecho 2 (MD 01) houve perda de mudas plantadas especialmente nos pontos em que o enrocamento apresentava baixa densidade de recobrimento do talude e significativa quantidade de solo exposto. A maior quantidade de mudas foi perdida pela ação das ondas nos meses iniciais e aparentemente em cotas mais baixas, ou seja, na zona mais suscetível de permanência do nível da água. Em zonas com denso recobrimento do talude por blocos de rocha, estes permitiram a proteção das mudas contra as solicitações lacustres, contribuindo para o desenvolvimento vegetativo. Devido à dificuldade de plantio entre os blocos de rocha, a densidade inicial de plantas neste subtrecho foi o menor dentre todos os subtrechos avaliados (Figura 59E). No entanto, as plantas deste subtrecho foram as que apresentaram o maior e o segundo maior desenvolvimento médio em diâmetro e altura, respectivamente, 33 meses após a primeira avaliação (Figura 59A e C). A

menor densidade de plantio pode ter influenciado maiores desenvolvimentos em diâmetro e altura. A menor densidade de plantio também resultou em maior ramificação das espécies arbustivas desde a base e conseqüentemente na emissão de maior quantidade de ramos. Estes aspectos também foram observados nos trechos ME 03 e ME 21. A recomendação técnica para aumento da pontuação do trecho é o reforço do plantio das espécies autóctones previstas em projeto, elevando a densidade de plantas.

As plantas no subtrecho 3 (MD 01) apresentaram desenvolvimento vegetativo excelente (diâmetro e altura) e similar ao observado para o subtrecho 2 (MD 01) (Figura 59A e C). As plantas apresentaram o maior diâmetro médio dentre todos os subtrechos avaliados e a segunda maior altura média aos 33 meses após a primeira avaliação. No entanto, sofreu considerável redução da densidade de plantio no mesmo período (Figura 59E e G). Assim como para o subtrecho 1 (MD 01), uma parte desta perda ocorreu nos meses iniciais de desenvolvimento das mudas plantadas entre linhas sucessivas de biorretentores que não possuíam suporte físico das estruturas inertes, ou seja, as mudas removidas pelas ondas não estavam plantadas nas adjacências imediatas das estruturas. No longo prazo, a continuação da redução da densidade de plantio provavelmente ocorreu devido a competição estabelecida entre espécies decorrente do vigoroso desenvolvimento vegetativo observado. Diferentemente do subtrecho 1 (MD 01), neste subtrecho não foram verificados danos nas estruturas inertes pela ação das ondas. Um dos motivos pode ser a estabilidade estrutural adicional proporcionada pelos sistemas radiciais das plantas que apresentaram desenvolvimento vigoroso. Este desenvolvimento também tende a ser maior quanto mais efetivo for o suporte físico proporcionado pelas estruturas às plantas mediante criação de perfil de compensação, manutenção da estabilidade do substrato, aporte e retenção de sedimentos e restos orgânicos. Em outras palavras, quanto melhores as condições ambientais para o pleno desenvolvimento das plantas, maior tenderá a ser este desenvolvimento e mais estável será o conjunto estrutura inerte-planta, aumentando o sucesso das intervenções e o controle dos processos erosivos.

Quanto ao desenvolvimento vegetativo nos trechos ME 03 e ME 21, todos os subtrechos intervencionados apresentaram pontuação adequada e dentro do esperado (Figura 58). A partir da Figura 59B e D é possível observar que o maior

diâmetro médio e altura média das plantas foram observados no subtrecho 7 (parede de prumo frontal + biorretentores (plantio em área)), seguido do subtrecho 1 (plantio esconso de espécies arbustivas), subtrecho 4 (parede de prumo frontal + biorretentores (plantio em linha)) e subtrecho 6 (parede de prumo frontal + plantio em quadrícula). Os dados indicam maiores crescimentos em diâmetro e altura nos subtrechos em que as plantas apresentaram maior espaçamento entre elas.

É interessante comparar as curvas médias de desenvolvimento em diâmetro e altura das plantas nos trechos ME 03 e ME 21 com os trechos ME 05 e MD 01. Em geral, o ritmo de crescimento vegetativo nos trechos ME 03 e ME 21 é superior aos crescimentos verificados na maioria dos subtrechos dos trechos ME 05 e MD 01, com exceção do subtrecho 2 e 3 (MD 01). Outro aspecto interessante é que, mesmo com 10 meses a menos de desenvolvimento, o subtrecho 7 (ME 21) apresenta diâmetros médios das plantas iguais ou similares aos subtrechos 2 e 3 (MD 01). Quando nos referimos à altura média das plantas, este desenvolvimento já é superior. O ótimo desempenho vegetativo nos trechos ME 03 e ME 21 é atribuído principalmente ao ajuste projetual das estruturas inertes considerando as fraquezas e as potenciais melhorias identificadas com a execução das técnicas nos trechos ME 05 e MD 01. Estruturas inertes robustas proporcionam a estabilidade local necessária para um desenvolvimento vegetativo vigoroso. Além disso, o arranjo construtivo e a alocação das estruturas devem ser realizados de tal forma para promover a retenção de sedimentos e restos orgânicos transportados pelo reservatório, o que resultará no aporte de matéria orgânica e nutrientes no longo prazo na faixa intervencionada para posterior aproveitamento pelas plantas. Este aporte é especialmente importante considerando a baixa fertilidade do solo em margens de reservatórios, uma vez que as camadas superficiais e mais férteis do perfil de solo já foram removidas pela dinâmica lacustre.

Os subtrechos 5 e 6 (ME 03) apresentaram diâmetros médios e alturas médias das plantas em geral inferiores aos subtrechos do trecho ME 21. O ritmo de crescimento das plantas em altura aparenta ser consideravelmente menor em comparação ao trecho ME 21, conforme pode ser observado na Figura 59D.

Em relação à densidade de plantio, os trechos ME 03 e ME 21 apresentaram poucas perdas de mudas em todos os subtrechos intervencionados em comparação aos trechos ME 05 e MD 01 (Figura 59F). As poucas perdas de plantas se devem provavelmente à eventual baixa qualidade das mudas e a competição estabelecida



entre os indivíduos à medida que estes se desenvolveram. Cabe destacar que não foram verificadas perdas de mudas nos meses iniciais após implantação e subsequentes pela ação das ondas, uma vez que o dimensionamento e alocação das estruturas inertes proporcionaram o suporte físico necessário ao efetivo estabelecimento das plantas.

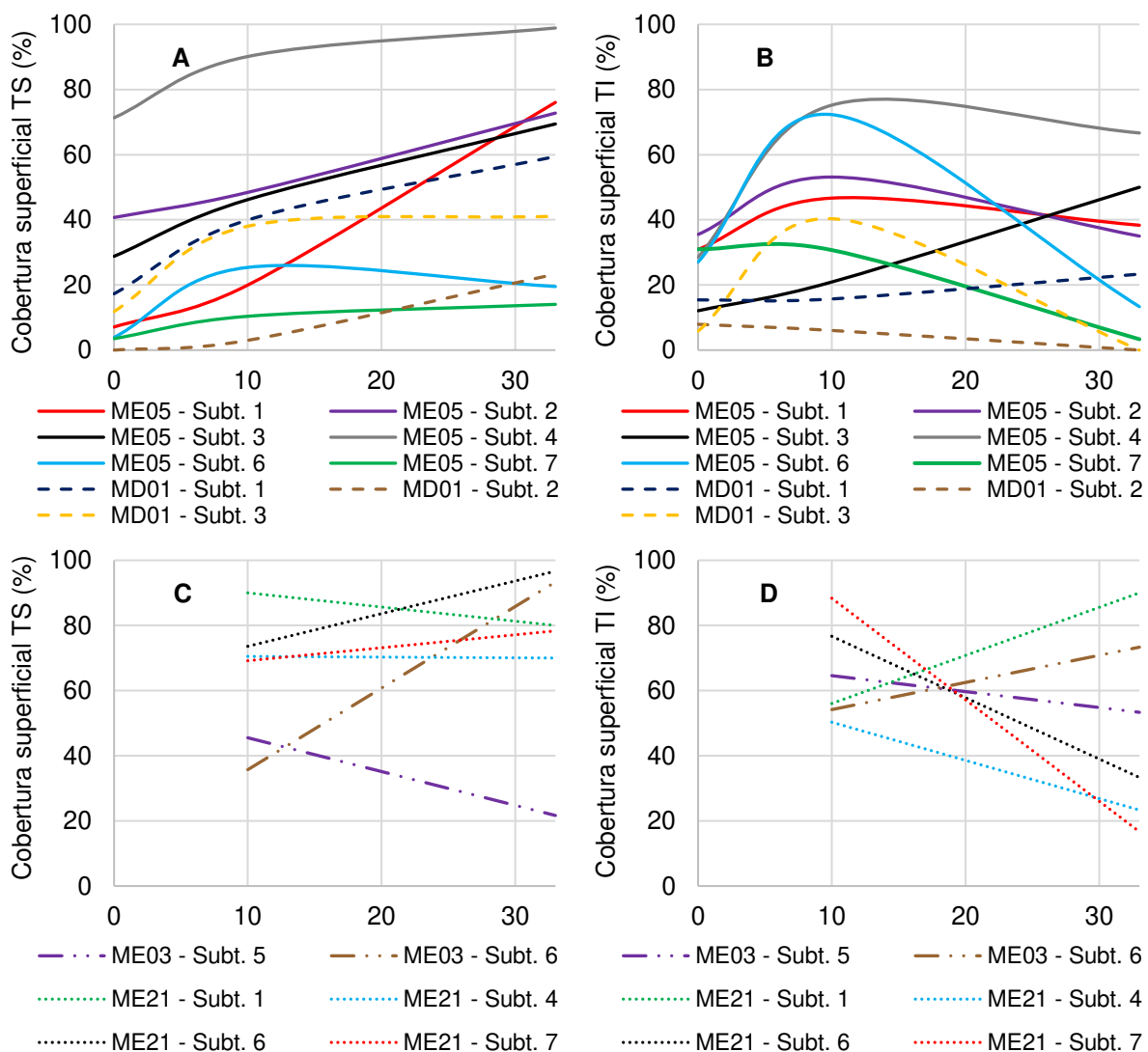
A Figura 60 apresenta as percentagens médias de cobertura superficial dos taludes superior e inferior conferido pelo desenvolvimento de espécies herbáceas autóctones implantadas em obra. O objetivo do uso de espécies herbáceas na faixa de intervenção foi contribuir para a estruturação superficial do solo e o controle dos processos erosivos nas entrelinhas de plantio de mudas arbustivas e estruturas inertes, quando presentes. O uso de espécie leguminosa (*Arachis repens* Handro) também teve como objetivo fixar nitrogênio atmosférico no solo, favorecendo o desenvolvimento vegetativo das espécies arbustivas implantadas em consórcio.

Na Figura 60A e B é possível observar que os taludes superiores apresentaram em geral maiores percentagens de cobertura do solo em comparação aos taludes inferiores nos 33 meses após a primeira avaliação. Isto ocorre porque o talude superior está menos suscetível à ação das ondas em comparação ao talude inferior, o que permite maior tempo de desenvolvimento e produção de biomassa das plantas presentes neste talude. Quando o nível do reservatório se encontra na cota máxima ou próximo dela, as espécies herbáceas localizadas no talude inferior permanecem submersas. Esta submersão pode perdurar por dias ou até mesmo semanas, resultando na perda de biomassa aérea das espécies herbáceas. Quando o nível do reservatório regressa para cotas baixas, os estolões e a parte aérea remanescente reiniciam o desenvolvimento vegetativo, tendendo a se alastrar para dentro do reservatório. Este ciclo de crescimento é novamente interrompido quando o nível da água retorna para cotas superiores. Esta dinâmica vegetativa condicionada à lacustre resulta em percentagens em geral menores de cobertura superficial do solo no talude inferior em relação ao talude superior.

Os taludes superiores nos trechos ME 05 e MD 01 apresentaram cobertura superficial por herbáceas reduzida (subtrecho 7) a satisfatória (subtrecho 1) com exceção do subtrecho 4, ambos do trecho ME 05. O subtrecho 4 apresentou altura e inclinação reduzida, favorecendo uma cobertura superficial mais efetiva. Os demais subtrechos (ME 05 e MD 01) apresentaram alturas e inclinações elevadas,

dificultando o desenvolvimento das espécies herbáceas. Concomitantemente, a ação das ondas no pé do talude superior e o desprendimento de partículas de solo dificultam ainda mais o recobrimento superficial, mesmo 33 meses após a primeira avaliação.

Figura 60 – Cobertura superficial do solo por espécies herbáceas (*Arachis repens* e *Sphagneticola trilobata*) no talude superior (TS) (A e C) e talude inferior (TI) (B e D) nos respectivos subtrechos intervencionados. As campanhas de monitoramento do desenvolvimento vegetativo ocorrem aos 0 meses, 10 meses e 33 meses.



Fonte: O autor.

A cobertura superficial do talude superior nos trechos ME 03 e ME 21 foi consistentemente superior em comparação aos trechos ME 05 e MD 01 aos 33 meses após a primeira avaliação. Os subtrechos apresentaram cobertura superficial superior a 70%, com exceção do subtrecho 5 (ME 03) (22%) (Figura 60C). A

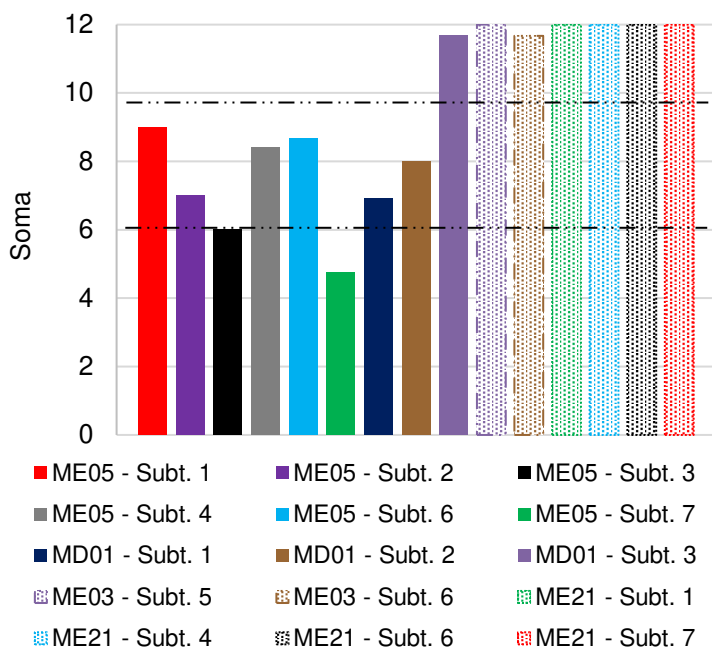
reduzida cobertura superficial do subtrecho 5 em comparação aos demais subtrechos se deve à deposição de grande quantidade de restos orgânicos durante cheia do reservatório, resultando no soterramento das espécies herbáceas. No entanto, a deposição destes restos orgânicos não causa a mortalidade das espécies, conforme observado várias vezes em campo, apenas reduz momentaneamente a sua biomassa aérea até que o desenvolvimento vegetativo sobre o material orgânico depositado se reinicie.

Diferentemente dos taludes superiores dos trechos ME 05 e MD 01, que apresentaram em geral alturas e inclinações elevadas, os taludes superiores dos trechos ME 03 e ME 21 apresentaram inclinações e alturas menores devido à presença de estrutura inerte de proteção na base do talude superior. Estas inclinações mais suaves do talude acima da estrutura permitiram recobrimentos superficiais mais efetivos do solo.

A maior parte dos taludes inferiores dos trechos ME 03 e ME 21 (Figura 60D) apresentaram cobertura superficial menor aos 33 meses em comparação à primeira avaliação, com exceção do subtrecho 6 (ME 03) e subtrecho 1 (ME 21). O principal motivo deste cenário foi a ocorrência de deposição de restos orgânicos no talude inferior após cheia do reservatório pouco antes da última avaliação, soterrando as espécies herbáceas. No entanto, é de se esperar que as espécies soterradas retomem o desenvolvimento vegetativo e a cobertura superficial inicial.

De modo a obter uma visão geral do desempenho das técnicas nos subtrechos intervencionados, considerando a integridade física, o efeito técnico e o desenvolvimento vegetativo, realizou-se a soma destas pontuações parciais e os resultados são apresentados na Figura 61. Os subtrechos com pontuação acima de 9,6 (linha pontilhada superior) não necessitam de manutenções nas técnicas implantadas. Os subtrechos com pontuação entre 6,0 e 9,6 (entre a linha pontilhada superior e inferior) devem receber manutenções para correção de falhas nas estruturas inertes, replantio ou adensamento de mudas, controle de formigas, adubações de cobertura, controle de espécies invasoras, entre outras. Os trechos com pontuações abaixo de 6,0 falharam ou se encontram em vias de falhar globalmente. As técnicas ainda presentes nas margens possuem efeito mínimo, ou inexistente, sobre o controle dos processos erosivos, sendo recomendada a reexecução completa destes subtrechos com arranjos construtivos mais eficazes.

Figura 61 – Soma da pontuação (integridade física, efeito técnico e desenvolvimento vegetativo) das intervenções executadas nos trechos ME 05, MD 01, ME 03 e ME 21. As intervenções nos trechos ME 05 e MD 01 foram pontuadas 33 meses após a execução e nos trechos ME 03 e ME 21, 23 meses após a execução.



Fonte: O autor.

Os resultados apresentados na Figura 61 indicam que apenas o subtrecho 3 (MD 01) atingiu pontuação adequada entre todos os subtrechos executados nos trechos ME 05 e MD 01. No entanto, a pontuação global de subtrechos como o 1, 2, 4 (ME 05) e 2 (MD 01) poderia ser elevada para patamares desejados apenas com o adensamento de plantio de mudas arbustivas em locais com pouca densidade e plantio de linhas inteiras que falharam pelo uso da técnica de propagação vegetativa ou intenso ataque de formigas cortadeiras. Subtrechos como o 6 (ME 05) e 1 (MD 01) necessitam de implantação, ajustes e/ou reforços de estruturas inertes complementado com o plantio de mudas arbustivas. Todos os subtrechos intervencionados nos trechos ME 03 e ME 21 apresentaram ótimas pontuações, não sendo necessária nenhuma medida técnica corretiva.

As figuras a seguir apresentam a evolução das técnicas implantadas nos trechos e respectivos subtrechos no reservatório da UHE Itá.

Figura 62 – Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 63 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 2) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 64 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 3) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 65 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 4) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 66 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 67 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 05 (subtrecho 7) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 68 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.



Figura 69 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 2) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 70 - Evolução das técnicas implantadas no trecho MD 01 (subtrecho 3) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 71 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 03 (subtrecho 5) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 72 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 03 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 73 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 1) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 74 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 4) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 75 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 6) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

Figura 76 - Evolução das técnicas implantadas no trecho ME 21 (subtrecho 7) do reservatório da UHE Itá.



Fonte: O autor e Rita SOUSA.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo quantitativo de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas brasileiras ainda não recebe a devida atenção e deve ser estimulado e difundido tanto pelos órgãos fiscalizadores como pelos próprios operadores dos empreendimentos. Esta pesquisa tem por objetivo contribuir para a conscientização do estudo deste tipo de fenomenologia em reservatórios mediante elucidação de alguns mecanismos condicionantes.

Os resultados apresentados indicam uma forte influência do comportamento oscilatório do nível da água sobre o quantitativo de erosões verificado nas margens, tanto erosões históricas acumuladas quanto em escala temporal pequena. Maiores erosões são esperadas quando o reservatório opera em cotas próximas da máxima normal, e vice-versa. Do ponto de vista dos processos erosivos, as erosões poderiam ser minimizadas operando-se o reservatório em cotas menores, mais distantes da cota máxima. No entanto, a adoção desta medida seria pouco realista, uma vez que a prioridade dos empreendimentos hidrelétricos é a geração de energia e o controle de enchentes, resultando no aproveitamento total da amplitude de oscilação da água projetada para o empreendimento.

O estudo dos quantitativos de erosões permitiu estabelecer relações com variáveis fisionômicas e locais que explicam satisfatoriamente os fenômenos observados. Constatou-se que a mobilização de solo em margens com presença de blocos de rocha difere de margens completamente desprovidas de blocos. Margens localizadas em baías apresentaram uma tendência de desgaste menor em comparação a margens localizadas no corpo do reservatório. No mesmo sentido, a cobertura superficial arbórea (floresta) fora do reservatório proporcionou menores recuos e desgastes das margens em comparação a margens com presença de vegetação de capoeira e gramíneas. Estes tipos de resultados auxiliam na identificação de trechos e planejamento de ações de controle, priorizando o tratamento de setores críticos do reservatório em detrimento de locais menos expostos e suscetíveis à erosão.

Do ponto de vista quantitativo de erosões, foram identificadas algumas variáveis importantes para a descrição dos fenômenos observados. As variáveis relacionadas direta ou indiretamente com o quantitativo de erosões observadas nas

margens são altura e inclinação dos taludes; altura das ondas; inclinação do terreno natural; índices físicos dos solos; *fetch*, perímetro de margem e área, estes dois últimos considerando o método de determinação do *fetch*, e umidade natural do maciço. Como estudos futuros recomenda-se a realização de um zoneamento do reservatório, classificando-o em zonas de maior e menor suscetibilidade à erosão por ondas tendo por base as variáveis identificadas e elencadas acima.

As variáveis estudadas e que não apresentaram relevância ou relevância substancial para o entendimento das fenomenologias erosivas observadas neste estudo são coesão do solo, ângulo de atrito interno, limite de liquidez, limite de plasticidade, índice de plasticidade, variáveis químicas do solo (matéria orgânica, pH) e textura do material. Não descarta-se a hipótese de inexistência de correlação destas variáveis com fenomenologias erosivas vigentes em outros reservatórios, inclusive no reservatório em questão, devendo-se realizar novos estudos que confirmem, ou contraponham, as constatações ora apresentadas.

A metodologia de monitoramento de erosões por meio de seções topográficas mostrou-se adequada para o acompanhamento da evolução dos processos nas margens considerando o pequeno período analisado (3,6 anos). A adoção de uma metodologia de medição de alta precisão foi importante para o caso das margens do reservatório em questão, já que estas, muitas vezes, apresentaram evolução reduzida ou mínima considerando taludes majoritariamente argilosos e perfis de solo bem desenvolvidos. Tendo em vista a lenta evolução das margens, salienta-se que as campanhas sucessivas de monitoramento para o reservatório em questão sejam realizadas a cada 3 a 5 anos, otimizando recursos financeiros e humanos.

Quanto ao controle de processos erosivos, a implantação de técnicas de Engenharia Natural nas margens do reservatório permitiu avanços tecnológicos e executivos fundamentais para disseminação deste tipo de intervenção em grandes reservatórios de água, como é o caso de usinas hidrelétricas. Em primeiro lugar, a implantação de diversas técnicas com utilização de diferentes materiais e arranjos construtivos permitiu a obtenção de um conjunto de soluções construtivas aptas para o tratamento de erosões em margens de reservatórios com características fisionômicas diversas. O conjunto de soluções testadas e com desempenho técnico satisfatório poderão não somente ser implantadas em outros pontos do reservatório em questão, mas também em reservatórios em outras regiões brasileiras. Ressalta-se que para execuções de obras em reservatórios em outras regiões brasileiras,

deve-se realizar previamente um estudo de vegetação autóctone resistente e adaptada à submersão parcial ou total para posterior uso nas margens alvo de projetos.

Considerando os resultados deste estudo e outras experiências acumuladas com intervenções em margens de reservatórios, recomenda-se a utilização de mudas previamente propagadas em viveiro como material construtivo vivo. Estas mudas podem ser produzidas via seminal ou vegetativamente, necessitando-se, para tanto, do domínio da tecnologia de propagação das respectivas espécies a serem utilizadas em intervenções.

As obras em reservatórios de acumulação devem ser executadas preferencialmente durante o período de estio (verão) ou em épocas em que o nível do reservatório opera em cotas baixas, permitindo maior segurança na execução e maior janela de desenvolvimento da vegetação antes de nova elevação do nível da água. Em reservatórios de fio de água, assim como de acumulação, deve-se realizar um estudo minucioso da série histórica de oscilação do nível da água como base para determinação da largura da faixa de intervenção e da época mais adequada para a execução da obra.

Do ponto de vista de estabelecimento pleno da vegetação utilizada nas intervenções, é fundamental a realização de monitoramentos e manutenções englobando controle de formigas, adubações de cobertura, replantio de mudas, controle de espécies invasoras, manutenção de cercas de isolamento das áreas intervencionadas, entre outras. Em alguns pontos dos trechos intervencionados observaram-se ataques severos de formigas e o estabelecimento de espécies invasoras, impedindo ou prejudicando o estabelecimento pleno da vegetação autóctone. A realização de monitoramentos e manutenções permite acompanhar o desempenho das intervenções e assegura a aplicação adequada dos recursos financeiros despendidos em obra, devendo ser realizadas vistorias e medidas corretivas regulares ou sempre que necessário pelo menos nos primeiros 3 anos após a execução da obra. As medidas de monitoramento e manutenção também devem abranger a integridade física das estruturas inertes.

Por fim, cabe mencionar que o estudo, compreensão e controle de processos erosivos em margens de grandes reservatórios de água é plenamente possível. Espera-se que os avanços obtidos nesta pesquisa possam incentivar órgãos

fiscalizadores e empreendedores no planejamento e implantação de medidas que minimizem os impactos ambientais inerentes à implantação e operação de grandes empreendimentos hidrelétricos.



## REFERÊNCIAS

- ALI, M. Plant functional types in Lake Nubia in relation to physicogeographic factors. **Limnologia**, v. 33, p. 305–315, 2003.
- AZZA, N. et al. Shoreline vegetation distribution in relation to wave exposure and bay characteristics in a tropical great lake, Lake Victoria. **Journal of Tropical Ecology**, v. 23, n. 3, p. 353–360, 2007.
- BANACH, M. Changes in geomorphology of new shoreline after the filling of the Włocławek artificial Lake. **Prace Geograficzne**, v. 116, p. 23–32, 2006.
- BAO, Y. et al. **Sedimentation in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China**. Proceedings of the ICCE symposium. **Anais...** In: ICCE-IAHS INTERNATIONAL SYMPOSIUM SEDIMENT DYNAMICS FOR A CHANGING FUTURE. Warsaw University of Life Sciences: IAHS Publ. 337, 2010
- BAO, Y. et al. Soil erosion in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China. **Hydrology Research**, v. 46, p. 212, 1 mar. 2015.
- 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.
- BAO, Y.; GAO, P.; HE, X. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir — A unique geomorphological unit. **Earth-Science Reviews**, v. 150, p. 14–24, 1 nov. 2015.
- BP. **Statistical Review of World Energy 2020**. 69. ed. London, UK: BP, 2020.
- 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.
- 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 maps 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.
- COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. **Use of vegetation in civil engineering**. London: CIRIA, 2007.

CYBERSKI, J. Erosion of banks of storage reservoirs in Poland. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 18, n. 3, p. 317–320, 1973.

DEWES, J. J. **Metodologia para monitoramento de processos erosivos em margens de reservatórios de usinas hidrelétricas**. Dissertação de Mestrado — Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2019.

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

DUTRA, V. F. **Diversidade de *Mimosa L.* (Leguminosae) nos campos rupestres de Minas Gerais: taxonomia, distribuição geográfica e filogeografia**. Tese de Doutorado — Viçosa, Brasil: Universidade Federal de Viçosa, 2009.

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

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

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

FISRWG. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices**. USA: Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998.

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.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle Size Analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). . **Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods**. SSSA. 2. ed. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1986. v. 9p. 383–411.

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

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

GOVERS, G. Relationship between discharge, velocity and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 17, n. 5, p. 515–528, 1992.

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

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

HAMPTON, M. A. et al. Processes that govern the formation and evolution of coastal cliffs. In: **Hampton, M.A., Griggs, G.B. (Eds.), Formation, Evolution, and Stability of Coastal Cliffs – Status and Trends**. Washington: US Geological Survey, 2004. p. 7–38.

HUANG, Z.-L. Biodiversity conservation for the Three Gorges Project. **Biodiversity Science**, v. 9, n. 4, p. 472–481, 2001.

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.

IAEG. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping part I: Rock and soil materials. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 19, p. 364–371, 1979.

ICOLD. **International Comission of Large Dams**. Disponível em: <[https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role\\_of\\_dams.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role_of_dams.asp)>. Acesso em: 10 jan. 2021.

JIANG, M. et al. Species richness in a riparian plant community along the banks of the Xiangxi River, the Three Gorges region. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, v. 12, n. 1, p. 60–67, 2005.

JOHANSSON, M. E.; NILSSON, C. Responses of riparian plants to flooding in free-flowing and regulated boreal rivers: an experimental study. **Journal of Applied Ecology**, v. 39, n. 6, p. 971–986, 2002.

JOHNSON, W. C. Riparian vegetation diversity along regulated rivers: contribution of novel and relict habitats. **Freshwater Biology**, v. 47, n. 4, p. 749–759, 2002.

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

KACZMAREK, H. et al. Impact of large water level fluctuations on geomorphological processes and their interactions in the shore zone of a dam reservoir. **Journal of Great Lakes Research**, v. 42, n. 5, p. 926–941, 1 out. 2016.

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

KEDDY, P. A.; REZNICEK, A. A. Great Lakes Vegetation Dynamics: The Role of Fluctuating Water Levels and Buried Seeds. **Journal of Great Lakes Research**, v. 12, n. 1, p. 25–36, 1986.

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

KRONVANG, B. et al. Importance of bank erosion for sediment input, storage and export at the catchment scale. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, p. 230–241, 2013.

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.

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

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. Ensaios aplicados 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.

NAGLE, G.; WOODBURY, P.; RITCHIE, J. Bank Erosion in Fifteen Tributaries in the Glaciated Upper Susquehanna Basin of New York and Pennsylvania. **Physical Geography**, v. 33, n. 3, p. 229–251, 2012.

NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H. The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 28, p. 621–658, 1997.

NEW, T.; XIE, Z. Impacts of large dams on riparian vegetation: applying global experience to the case of China's Three Gorges Dam. **Biodiversity and Conservation**, v. 17, n. 13, p. 3149–3163, 2008.

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

NILSSON, C.; BERGGREN, K. Alterations of Riparian Ecosystems Caused by River Regulation. **BioScience**, v. 50, n. 9, p. 783–792, 2000.

NILSSON, C.; JANSSON, R.; ZINKO, U. Long-Term Responses of River-Margin Vegetation to Water-Level Regulation. **Science**, v. 276, n. 5313, p. 798–800, 1 jun. 1997.

NILSSON, C.; SVEDMARK, M. Basic Principles and Ecological Consequences of Changing Water Regimes: Riparian Plant Communities. **Environmental Management**, v. 30, n. 4, p. 468–480, 2002.

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.

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. **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.

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.

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.

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.

SIGA. **Usinas por tipo de atuação**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/siga>>. Acesso em: 10 jan. 2023.

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.

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. **Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural**. Dissertação de mestrado—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

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.

SOUSA, R. S.; DEWES, J. J.; SUTILI, F. J. **Viabilidade econômica de uma obra de estabilização fluvial realizada com técnicas de Engenharia Natural**. Anais do XIII Congresso Florestal Estadual do Rio Grande do Sul. **Anais...** In: XIII CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL. Nova Prata: 2018

SOUSA, R. S.; DEWES, J. J.; SUTILI, F. J. **Viabilidade econômica de uma obra para controle de processos erosivos com técnicas de Engenharia Natural**. Anais do 5º SSS Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis. **Anais...** In: 5º SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS. Porto Alegre: GFM, 2019

SPANILLA, T. **Geodynamical processes on the banks of the water reservoir Nechranice**. Proceedings of the Workshop: Geodynamical Hazards Associated with Large Dams. **Anais...** In: GEODYNAMICAL HAZARDS ASSOCIATED WITH LARGE DAMS. Luxemburg: Manfred Bonatz, 1998

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

SU, X. et al. Soil erosion and deposition in the new shorelines of the Three Gorges Reservoir. **Science of The Total Environment**, v. 599–600, p. 1485–1492, 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.

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.

VANNOPPEN, W. et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. **Earth-Science Reviews**, v. 150, p. 666–678, 2015.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 1. ed. São Paulo: McGraw - Hill do Brasil, 1978.

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.

VILMUNDARDÓTTIR, O. K. et al. Shoreline erosion and aeolian deposition along a recently formed hydro-electric reservoir, Blöndulón, Iceland. **Geomorphology**, v. 114, n. 4, p. 542–555, 2010.

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

WOHL, E. **Rivers in the Landscape: Science and Management**. USA: Wiley-Blackwell, 2014.

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.

YANG, F. et al. Riparian vegetation's responses to the new hydrological regimes from the Three Gorges Project: Clues to revegetation in reservoir water-level-fluctuation zone. **Acta Ecologica Sinica**, v. 32, n. 2, p. 89–98, 2012.

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

ZARFL, C. et al. A global boom in hydropower dam construction. **Aquatic Sciences**, v. 77, p. 161–170, 2015.

ZHU, L. et al. The influence of human activities on morphodynamics and alteration of sediment source and sink in the Changjiang Estuary. **Geomorphology**, v. 273, p. 52–62, 2016.





## APÊNDICE A – CATEGORIAS DE PONTUAÇÃO DA EFICÁCIA DAS INTERVENÇÕES

Figura 77 – Categorias de pontuação e respectivas descrições para avaliação da eficácia das técnicas de Engenharia Natural implantadas no reservatório da UHE Itá.

### INTEGRIDADE DA TÉCNICA

1	destruída
2	danos severos
3	danos leves
4	bom / sem danos

### EFEITO DA TÉCNICA

1	desprezível
2	insatisfatório
3	bom
4	muito bom

### DESENVOLVIMENTO VEGETAT.

1	sem desenvolvimento
2	baixo desenvolvimento
3	bom desenvolvimento
4	desenvolvimento vigoroso

### DESCRIÇÃO

- 1 A estrutura é reconhecível apenas de forma rudimentar/precária ou inexistente
  - 2 Tanto a estrutura (material inerte) como as plantas aplicadas (material vivo) apresentam danos severos, de modo que uma falha total é iminente
  - 3 Danos visíveis na estrutura (material inerte) e nas plantas aplicadas (material vivo). Por causa do desenvolvimento e capacidades mecânicas das plantas é altamente provável que a componente vegetal compense os danos e não permita a falha da estrutura
  - 4 Tanto a estrutura (material inerte) como as plantas aplicadas (material vivo) estão visivelmente em boa condição.  
Não há danos reconhecíveis que possam resultar em falha da estrutura no curto prazo
- 
- 1 O efeito desejado da estrutura não é alcançado e é classificado como disfuncional
  - 2 O efeito desejado da estrutura é alcançado em pequena medida e ainda é reconhecível
  - 3 O efeito desejado da estrutura é alcançado em boa medida e é reconhecível, mas menos evidente que no nível "muito bom"
  - 4 O efeito desejado da estrutura é integralmente alcançado e reconhecível
- 
- 1 As plantas estão mortas, perecendo ou ausentes
  - 2 Reduzida massa foliar, folhas verde-amareladas, reduzido desenvolvimento de tronco e altura (baixa densidade de plantas)
  - 3 Folhas verdes, massa foliar um pouco reduzida, bom desenvolvimento de tronco e altura (média densidade de plantas)
  - 4 Folhas verdes e vigorosas, alta massa foliar, vigoroso desenvolvimento de tronco e altura (alta densidade de plantas)

Fonte: O autor.

Figura 78 – Planilha para pontuação do desempenho (integridade, efeito e desenvolvimento vegetativo) das técnicas construtivas executadas nos diversos subtrechos no reservatório da UHE Itá.

Trecho		Pontuação (1 - 2 - 3 - 4)		
Subtrecho	Técnica	Integridade	Efeito	Desenv.
1	A			
	B			
	C			
	D			
2	A			
	B			
	C			
	D			
3	A			
	B			
	C			
	D			
...	...			
	...			
	...			
	...			

Fonte: O autor.