

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

TÁSSIA CESTARI FERNANDES

**APORTE DE SEDIMENTOS NA ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO DA UHE OURINHOS**

**Ilha Solteira
2021**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS**

TÁSSIA CESTARI FERNANDES

**APORTE DE SEDIMENTOS NA ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO DA UHE
OURINHOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Prof. Dr. Paulo César Rocha
Orientador

Prof. Dr. Milton Dall'Ágglio Sobrinho
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- F363a Fernandes, Tássia Cestari.
Aporte de sedimentos na estimativa da vida útil de reservatórios hidrelétricos: estudo de caso da UHE Ourinhos / Tássia Cestari Fernandes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
79 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Regulação e Governança de Recursos Hídricos, 2020
- Orientador: Paulo César Rocha
Coorientador: Milton Dall'Áglio Sobrinho
Inclui bibliografia
1. Aporte de sedimentos. 2. InVEST. 3. EUPS.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: APORTE DE SEDIMENTOS NA ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL DE
RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO DA UHE OURINHOS**

**AUTORA: TÁSSIA CESTARI FERNANDES
ORIENTADOR: PAULO CÉSAR ROCHA**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, área: Regulação e Governança de Recursos Hídricos pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. PAULO CÉSAR ROCHA (Participação Virtual)
Departamento de Geografia / FCT/UNESP - Campus de Presidente Prudente



Prof. Dr. CÉSAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Profa. Dra. ISABEL CRISTINA MOROZ CACCIA GOUVEIA (Participação Virtual)
. / FCT/UNESP/Presidente Prudente (SP)

Ilha Solteira, 18 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e irmã, pelos ensinamentos e incentivos, que foram fundamentais para a formação do meu caráter e realização das minhas conquistas.

Ao meu noivo Bruno, meu companheiro de vida, pelo amor, dedicação e paciência.

Aos meus tios Euclides, Wilerson e Washington que foram essenciais para meu crescimento profissional.

Às minhas companheiras do Mestrado, Adriana, Renata e Daniela, pelas conversas, conselhos, compreensão, incentivos e força.

Ao meu orientador Paulo César Rocha, por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho, pelo auxílio, apoio e confiança depositado em mim.

Aos professores da área de Recursos Hídricos, que contribuíram para o meu amadurecimento acadêmico e profissional.

À Secretaria do ProfÁgua, que sempre tirou todas as dúvidas com maior proatividade.

Ao Professor Jefferson Nascimento que trabalhou muito para que o ProfÁgua fosse um sucesso, como é hoje.

Ao apoio técnico científico da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015.

E a todos que me acompanharam nessa caminhada de forma mais indireta, e permitiram uma caminhada menos tempestuosa nestes últimos anos, o meu eterno agradecimento.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia”.

Robert Collier

RESUMO

A avaliação do potencial de produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica contribuinte de uma hidrelétrica é de extrema importância tanto na fase de viabilidade do projeto até a operação de uma unidade geradora, pois o assoreamento pode comprometer a eficiência e longevidade do empreendimento. Deste modo, este estudo teve como objetivo avaliar o aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos, com o intuito de verificar a taxa de transferência de sedimentos para cálculo da vida útil do reservatório. A bacia contribuinte está localizada na Bacia Hidrográfica do rio Paranapanema, sendo um grande parque na geração de energia hidrelétrica. A perda total de solo da bacia foi calculada por meio do Software InVEST que utiliza a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), sendo possível avaliar quantitativamente o aporte de sedimentos que atingem os corpos d'água, fundamental para a tomada de decisão no planejamento ambiental e operação do reservatório. Foi realizado o cálculo de vida útil do reservatório, por meio da obtenção da Curva Cota-Área-Volume (CAV) e da estimativa da descarga sólida total por meio do Método de Coby (1957). Os resultados demonstram que a bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos é pouco suscetível a inundações, em condições normais de precipitação. O uso do Solo da bacia representa a maior área em pastagem, onde foi observado a maior perda de solo. Além do mais, a produção total de sedimentos da bacia é de 407.126,43 t/ano para o ano de 2017 e uma taxa de transferência de sedimentos de 23%. No cálculo de vida útil, foi considerado o tempo de assoreamento até a cota da soleira da Tomada d'Água da barragem, chegando a 751 anos de operação. Desse modo, o adequado monitoramento do reservatório proporciona uma melhor operação dos reservatórios e conseqüentemente, na geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Aporte de Sedimentos. InVEST. EUPS.

ABSTRACT

The evaluation of the sediment production potential of a hydrographic basin that contributes to a hydroelectric is extremely important both in the project's feasibility phase until the operation of a generating unit, as silting up can compromise the enterprise's longevity. Thus, this study aimed to evaluate the sediment input in the contributing hydrographic basin of the Ourinhos HPP, in order to verify the sediment transfer rate to calculate the useful life of the reservoir. The contributing basin is located in the Paranapanema River Basin, being a large park in the generation of hydroelectric energy. The total soil loss in the basin was formed using the InVEST Software that uses the Universal Soil Loss Equation (USLE), making it possible to quantitatively assess the amount of sediments that reach the water bodies, which is fundamental for decision making in the environmental planning and reservoir operation. The calculation of the reservoir's useful life was performed by obtaining the Depth-Area-Volume Curves and estimating the total solid discharge using the Coby Method (1957). The results show that the hydrographic basin that contributes to UHE Ourinhos is not susceptible to flooding, under normal conditions. The use of soil in the basin is most representative by pasture areas, where the greatest loss of soil was observed. In addition, the total sediment production in the basin is 407,126.43 t / year for the year 2017 and a sediment transfer rate of 23%. In the calculation of useful life, the silting time up to the threshold of the Intake Structure of the Dam, reaching 751 years of operation. Thus, the adequate monitoring of the reservoir offers a better operation of the reservoirs and, consequently, in the generation of electric energy.

Key words: Sediment Input. InVEST. EUPS.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ocorrências típicas dos processos de erosão, transporte e deposição. ...	17
Figura 2 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios ...	26
Figura 3 – UHE Ourinhos	39
Figura 4 – Bacia hidrográfica contribuinte e localização da UHE Ourinhos	40
Figura 5 – Mapa Pedológico.....	45
Figura 6 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa InVEST	47
Figura 7 – Dados de Entrada no Módulo SDR no Software InVEST	49
Figura 8 – Modelo Digital de Elevação da Bacia contribuinte da UHE Ourinhos.....	51
Figura 9 - Software netErosividade SP	52
Figura 10 – Mapa de Erosividade da chuva	54
Figura 11 – Mapa de Erodibilidade – Fator K.....	56
Figura 12 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo.....	58
Figura 13 – Modelo Digital do Reservatório da UHE Ourinhos	62
Figura 14 – Curva Cota x Área x Volume do Reservatório da UHE Ourinhos.....	63
Figura 15 - Programa utilizado para o cálculo da descarga sólida total, pelo método de Colby, elaborado por Prodanoff (1996, 2008).	64
Figura 16 - Descarga anual de sedimentos para o período de 2000 a 2010.....	65
Figura 17 - Curva de Eficiência de Retenção	67
Figura 18 – de Estimativa de perda de solo na bacia contribuinte da UHE Ourinhos	68
Figura 19 – Estimativa de Perda de Solo	69
Figura 20 – Sedimentos exportados na Bacia Contribuinte da UHE Ourinhos	71

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do reservatório para cálculo de Er	31
Tabela 2 – Quantidade de estações de monitoramento junto à Área de Drenagem Incremental.....	36
Tabela 3 - Frequência desejável para levantamentos topobatimétricos de reservatórios.....	38
Tabela 4 – Informações do reservatório UHE Ourinhos.....	41
Tabela 5 - Caracterização Fisiográfica da Bacia Hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos.....	41
Tabela 6 – Tipos de Solo na Bacia contribuinte da UHE Ourinhos.	44
Tabela 7 – Classificação da erosão	48
Tabela 8 – Classes de erosividade (Fator R)	53
Tabela 9 – Fator de Erodibilidade K correlacionados com o tipo de solo.....	55
Tabela 10 – Classes de Erodibilidade	55
Tabela 11 -Classes de uso do solo da bacia contribuinte da UHE Ourinhos	57
Tabela 12 – Fator de uso e manejo do solo (C) e o fator de práticas conservacionistas (P)	59
Tabela 13 – Parâmetros de Calibração utilizados.	60
Tabela 14 – Dados da Estação utilizada.....	64
Tabela 15 - Peso específico médio aparente de longo prazo de depósitos em reservatórios em t/m ³	66
Tabela 16 – Dados utilizados para obtenção da eficiência de retenção.....	67
Tabela 17 – Cálculo da Vida Útil.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1	ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS.....	16
3.1.1	<i>Produção de Sedimentos em Bacia hidrográfica</i>	<i>16</i>
3.1.2	<i>Erosão.....</i>	<i>17</i>
3.1.3	<i>Fatores que Influenciam na erosão</i>	<i>19</i>
3.1.4	<i>Dinâmica dos Sedimentos na Bacia Hidrográfica</i>	<i>21</i>
3.1.5	<i>Equação universal de perdas de solo (EUPS)</i>	<i>22</i>
3.1.6	<i>Taxa de Transferência de sedimentos – SDR.....</i>	<i>24</i>
3.2	AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO	25
3.3	PREVISÃO DA VIDA ÚTIL	27
3.3.1	<i>Eficiência de retenção do sedimento afluente ao lago (Er).....</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Peso específico aparente médio dos depósitos, em t/m³ (γ_{ap}).....</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Descarga Sólida Total</i>	<i>32</i>
3.4	MONITORAMENTO E CONTROLE DE SEDIMENTOS EM RESERVATÓRIOS ...	33
3.4.1	<i>Medidas Preventivas</i>	<i>34</i>
3.4.2	<i>Medidas Corretivas.....</i>	<i>34</i>
3.4.3	<i>Resolução Conjunta ANA / ANEEL Nº 03</i>	<i>35</i>
3.4.4	<i>Batimetria em Reservatórios</i>	<i>37</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	UHE OURINHOS.....	39
4.1.1	<i>Características Físicas.....</i>	<i>41</i>
4.1.2	<i>Características Pedológicas.....</i>	<i>43</i>
4.2	ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS.....	46
4.2.1	<i>Modelo InVEST.....</i>	<i>46</i>
4.2.2	<i>Dados de Entrada para o InVEST</i>	<i>49</i>
4.3	VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO.....	61
4.3.1	<i>Cota-Área-Volume</i>	<i>61</i>
4.3.2	<i>Descarga Sólida Total</i>	<i>64</i>
4.3.3	<i>Peso específico aparente estimado.....</i>	<i>65</i>
4.3.4	<i>Eficiência de retenção do sedimento</i>	<i>66</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1	ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS.....	68
5.1.1	<i>Taxa de Transferência de Sedimentos</i>	<i>70</i>

5.2	VIDA ÚTIL.....	72
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens e formação de reservatórios implicam em modificações nas condições naturais do curso no curso d'água, reduz a velocidade da corrente, considerando o impedimento da passagem da maior parte dos sólidos suspensos na água para a jusante, provocando uma deposição gradual de sedimentos. Logo, seja o reservatório para fins de irrigação, abastecimento e geração de energia elétrica, o conhecimento da vida útil do empreendimento dependerá diretamente do fluxo de sedimentos no curso d'água.

Embora a riqueza em recursos hídricos do Brasil, seja estimada em 12% de toda a água doce do mundo, os climas típicos de regiões tropicais, com chuvas intensas no verão, causam a erosão e, conseqüentemente, o assoreamento dos reservatórios, impactando de forma negativa o desempenho na produção de energia de grande parte das hidrelétricas brasileiras (ZANELLA, 2016).

Segundo GUERRA et al., (1995), o processo de assoreamento encontra-se intimamente relacionado aos processos erosivos da bacia hidrográfica, uma vez que este processo é que fornece os materiais que darão origem ao assoreamento. Quando não há energia suficiente para transportar o material erodido, este material é depositado.

Neste contexto, faz-se necessário a promoção do monitoramento e práticas conservacionistas na busca pela diminuição da erosão nas bacias hidrográficas. Desta forma, é importante a procura por conhecimento sobre a distribuição da erosão e os fatores (precipitação, estrutura do solo, forma da paisagem, entre outros) que contribuem para a mesma. (DOMINGOS, 2006).

Como lembra Carvalho (2000), estudos dessa natureza sempre trazem experiências e novos conhecimentos no campo da Sedimentologia. Assim, o monitoramento sedimentométrico de postos nos cursos d'água, a verificação dos problemas de erosão nas margens do lago e também no canal a jusante da barragem, bem como o levantamento topobatimétrico dos reservatórios, trazem subsídios tanto para os empreendedores como para a Ciência.

Em virtude dos fatos apresentados, o objetivo deste trabalho é o de analisar o aporte de sedimentos na vida útil do reservatório da UHE Ourinhos, situado na bacia hidrográfica do rio Paranapanema. Ao longo de seu curso estão implantadas 11 usinas hidrelétricas sendo importante parque de geração hidrelétrica. A UHE Ourinhos é a quinta usina da cascata.

Por tais razões, este trabalho contribui para o monitoramento adequado do aproveitamento hidrelétrico do reservatório da UHE Ourinhos, do aporte de sedimentos e, assim, o cálculo da vida útil do empreendimento, além de subsidiar a tomada de decisão quanto às atividades de fiscalização, regulação, operação e mediação no setor elétrico e, assim, proporcionar melhores contribuições ao gerenciamento do reservatório.

2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo é o de avaliar o aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos, com o intuito de verificar a taxa de transferência de sedimentos para cálculo da vida útil do reservatório.

Os Objetivos específicos são:

- Calcular aporte de sedimentos na bacia de contribuição do reservatório por meio do Software InVEST;
- Calcular a Descarga Sólida Total por meio do Método de Colby, para estimativa da vida útil do reservatório e obter a taxa de transferência e sedimentos da bacia;
- Calcular a Vida Útil do Reservatório da UHE Ourinhos, considerando as variáveis obtidas no aporte de sedimentos;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS

3.1.1 *Produção de Sedimentos em Bacia hidrográfica*

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997).

Conforme Collischonn (2012), diversos fatores influenciam na forma como a água da chuva interage com a bacia, como por exemplo, o clima, solos, as rochas do subsolo e a vegetação. Além disso, tem-se o fator morfométrico, que está associado ao relevo, área de drenagem, comprimento do curso de água principal e também a declividade.

A análise morfométrica de bacias hidrográficas, pode ser definida como a “análise quantitativa das interações entre a fisiografia e a sua dinâmica hidrológica” que permite um conhecimento da dinâmica fluvial, bem como das relações existentes entre ela e os diversos componentes do meio físico e biótico de uma bacia hidrográfica, conforme Faria et al. (2009).

Todos os acontecimentos que ocorrem na bacia de drenagem, repercutem direta ou indiretamente nos rios. Nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras regiões do mundo, os processos erosivos causados pela água da chuva (fator climático) têm abrangência em quase toda a superfície terrestre. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em certas estações do ano, o que agrava ainda mais a erosão (GUERRA et al., 1999).

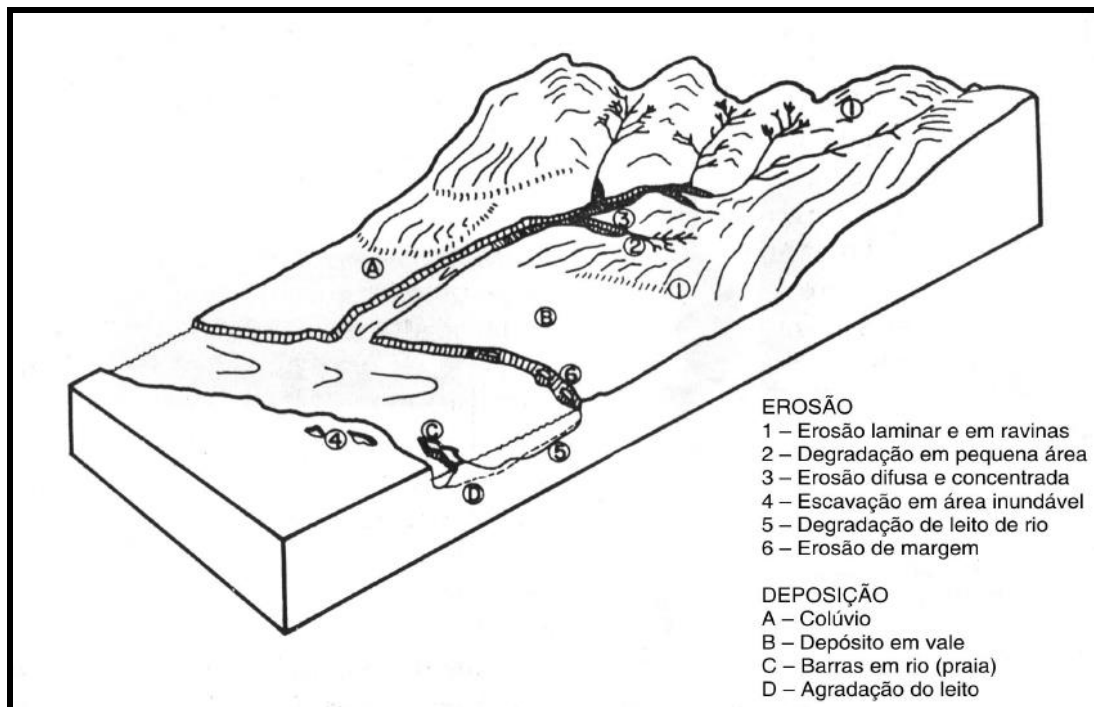
A partir de estudos por Walling (2006), realizados para avaliar as mudanças anual no escoamento e no transporte de sedimento, em estações de medições localizadas a jusante de 142 rios no mundo constaram que em relação ao escoamento houve um aumento de 8,5% dos rios, um decréscimo de 22,5% e mantiveram-se estáveis 69% dos rios avaliados. Quanto ao transporte de

sedimentos, os autores constataram que em 2,8% dos rios houve um aumento, 47,9% redução e em 49,3% mantiveram sua estabilidade anual em relação ao transporte de sedimentos.

Para Walling (1994), a produção de sedimentos é a carga de sedimentos normalizada para a área de rede de drenagem e é o resultado dos processos de erosão e deposição que ocorre dentro de uma bacia hidrográfica. Assim a produção de sedimentos, é controlada por aqueles fatores que controlam a erosão e o aporte de sedimentos dentro da bacia.

Uma vez ocorrida a precipitação, o escoamento das águas vai ocasionar diferentes tipos de erosão. A Figura 1 apresenta as ocorrências típicas de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

Figura 1 – Ocorrências típicas dos processos de erosão, transporte e deposição.



Fonte: Vanoni 1977; Carvalho 1994.

3.1.2 Erosão

A erosão é um fenômeno do desgaste das rochas e solos, com desagregação, deslocamento ou arrastamentos das partículas por ação da água e outros agentes, como o vento. (CARVALHO, 2008, p.33).

Conforme Barreto, 2007, a Erosão é um tema complexo que envolve aspectos físicos, ambientais, econômicos, sociais e políticos. Nos últimos 100 anos de história, o principal enfoque da pesquisa foi nos aspectos físicos. Desse modo, pode-se dizer que a preocupação com a erosão foi responsável por um grande número de contribuições científicas à ciência no solo, no decorrer do século XX.

A erosão laminar se processa durante as fortes precipitações, quando o solo superficial já está saturado, sendo produzida por um desgaste suave e uniforme da camada superficial em toda sua extensão. Esse tipo de erosão se desenvolve quando há pouco obstáculo, permitindo o escoamento de uma lâmina de água (CARVALHO, 1994).

De acordo com Hillel (1998) a erosão hídrica é dividida em:

- Erosão laminar: é caracterizada por uma remoção mais ou menos uniforme das camadas finas de solo, a partir de uma relativa inclinação, carregada para baixo por uma enxurrada uniformemente distribuída pela superfície do solo.
- Erosão em sulcos: é formada quando canais de enxurrada se movem para baixo da rampa e o fluxo de água é concentrado devido às irregularidades na superfície do solo e topografia. O escoamento concentrado resultante escava mais profundamente a superfície, criando sulcos ou canais pequenos e bem definidos.
- Erosão em canais ou por voçorocas: acontece se sulcos de erosão se desenvolvem, formando profundas escavações na superfície do solo, atingindo o lençol freático, os quais se tornam canais. Por causa das altas velocidades que o fluxo de água pode alcançar nos canais, grande remoção de solo é possível neste tipo de erosão.
- Erosão de canais de rio: forma-se ao longo dos canais e leitos dos rios por causa das forças de corte exercidas sobre essas superfícies pela erosão.

Em relação aos agentes erosivos, são os elementos do meio físico que afetam diretamente a erosão, podendo ser agentes passivos ou ativos (Quadro 1):

Quadro 1 – Esquema Geral da Erosão e Agentes erosivos

Erosão			
Formas de Erosão		Agentes Erosivos	
Geológica	Acelerada, induzida ou antrópica	Ativos	Passivos
		Água	Topografia
		Insolação	Gravidade
		Vento	Tipo de Solo
		Ação de microorganismos	Cobertura Vegetal
		Ação de animais	Formações superficiais
		Ação humana	

Fonte: Carvalho, 2008 (Adaptado).

3.1.3 Fatores que Influenciam na erosão

Dentre os principais fatores que influenciam os processos erosivos estão: a erosividade da precipitação, medida principalmente pela sua intensidade; a erodibilidade, definida pelas características físicas e químicas do solo; a cobertura vegetal, pela sua maior ou menor proteção do solo, a morfologia das vertentes; e as práticas de conservação e manejo dos solos existentes (ALVARES; PIMENTA, 1998).

Nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são bem mais elevados do que em outras regiões do mundo, os processos erosivos causados pela água da chuva (fator climático) têm abrangência em quase toda a superfície terrestre. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em certas estações do ano, agravando ainda mais a erosão (GUERRA et al., 1999).

Ainda de acordo com Guerra et al. (1999) a ação erosiva da chuva depende da distribuição pluviométrica, mais ou menos, regular, no tempo e no espaço, e sua intensidade. Chuvas torrenciais ou pancadas de chuvas intensas constituem a forma mais agressiva de impacto da água no solo. Durante esses eventos a aceleração da erosão é máxima.

A erosividade é o índice que expressa a capacidade da chuva em provocar erosão. Quando os outros fatores que provocam a perda do solo são mantidos constantes, a erosividade é proporcional ao produto da energia cinética total das gotas de chuva e sua intensidade máxima em trinta minutos. Essa relação é considerada a melhor para medir a potencialidade erosiva da chuva. (AZEVEDO, 2017).

O solo tem sua influência no processo erosivo devido às suas propriedades físicas, principalmente textura, estrutura, permeabilidade e densidade, e às suas propriedades químicas, biológicas e mineralógicas. Essas características, correlacionadas, determinam a maior ou menor capacidade de propiciar a erosão laminar, isto é, a sua erodibilidade.

Portanto, o fator erodibilidade do solo tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas unitárias expresso como a perda de solo por unidade de índice de erosão da chuva (GUERRA et al., 1999).

Outro fator de suma importância para cálculo de perdas por erosão, é o Fator LS, que é a relação entre o comprimento de declive e declividade (Carvalho 2008).

Para Agassi (1996), a cobertura vegetal afeta diretamente o processo de desagregação do solo pela interceptação e pela dissipação de energia cinética antes de impactar a superfície do solo.

A topografia do terreno influencia a erosão do solo principalmente pela declividade e pelo comprimento de rampa (GUERRA et al., 1999). Esses fatores interferem diretamente na velocidade das enxurradas.

Para Guerra et al. (1999) a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão e a sua influência no processo de perda de solo é definida pelos fatores: uso e manejo do solo e prática conservacionista. Assim quando o solo da região é descoberto devido à construção de estradas ou atividades agrícolas aumenta o potencial de erosão do solo bem como seus impactos ambientais.

O uso do solo também influencia diretamente na produção e na qualidade da água gerada pelas microbacias hidrográficas. A falta de um planejamento adequado

para o uso do solo acarreta graves problemas ambientais, como erosão, e, conseqüentemente, assoreamento de rios, canais e reservatórios. Assim, é necessário conhecer os potenciais e fragilidades do meio físico e as condições socioeconômicas para que se possa desenvolver sistemas sustentáveis de produção.

O uso e manejo do solo tem a propriedade de atenuar ou agravar os fatores anteriores (VERSTRAETEN et al., 2006). A alteração da cobertura vegetal natural para o uso agrícola, por exemplo, pode modificar a produção de sedimento em várias ordens de magnitude, em comparação com uma área não perturbada (MORGAN, 2005).

3.1.4 Dinâmica dos Sedimentos na Bacia Hidrográfica

A erosão das margens de rios e lagos, por causa da supressão vegetal, causam o depósito de sedimentos e em decorrência o assoreamento, o processo se agrava quando se instala reservatórios artificiais, mudando o equilíbrio dos cursos d'água próximos ao reservatório, ocasionando problemas relativos a erosão e assoreamento.

Conforme Wilson (2005), o movimento das partículas sólidas em um curso d'água se efetua através de um complexo sistema de erosão, transporte, e sua respectiva deposição de sedimentos, denominado sedimentação. Em termos de equilíbrio, a quantidade de sedimentos erodidos deve ser igual à quantidade transportada no mesmo intervalo, de modo a garantir a estabilidade da calha fluvial. Quando ocorre uma intervenção externa capaz de modificar um ou mais fatores da morfologia fluvial, a resposta do sistema pode ocorrer através dos seguintes mecanismos:

- Assoreamento do Leito;
- Redução da capacidade de vazão dos rios e canais;
- Redução da Vida útil de reservatórios;

- Formação de bancos de areia em canais de navegação e etc.

O processo de sedimentação se inicia com o simples deslocamento de grãos provocado pelo impacto direto da chuva e é completado pela ação das formas hidrodinâmicas geradas pelo escoamento superficial resultante. Esta é a etapa inicial do processo de sedimentação e representa a origem dos problemas derivados do sedimento no meio ambiente (CARVALHO 2008; WILSON JR, 2005).

A segunda etapa da sedimentação, é o transporte de sedimentos. O transporte de sedimentos pela água é regido pela relação entre a capacidade de carregamento do escoamento e a força necessária para deslocar as partículas sólidas disponíveis em seu curso e ocorre em maior parte, nas épocas chuvosas. Cerca de 70% a 90% de todo o sedimento é transportado neste período, principalmente nos grandes eventos pluviométricos (LEOPOLD et al., 1964, apud ROCHA, 2016).

A terceira e última etapa do processo de sedimentação é a deposição de sedimentos. Os materiais sólidos são geralmente depositados no leito dos lagos e reservatórios graças ao transporte de sedimentos através das enxurradas, de areia, silte e argila, da bacia de contribuição (SILVA, 2004).

Com isto há uma desaceleração do movimento das partículas sólidas na direção do escoamento, fazendo com que se depositem ao longo do reservatório. Assim, as partículas de maior diâmetro vão se depositando na entrada do reservatório, enquanto as mais finas vão se acumular em posições mais abaixo do reservatório ou permanecem em suspensão, podendo chegar às estruturas de descarga (PAIVA; PAIVA, 2003).

3.1.5 Equação universal de perdas de solo (EUPS)

O modelo empírico mais conhecido e utilizado para estimativa de taxas de perda de solo por erosão é a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS). Este modelo matemático foi desenvolvido em 1954 pelo *National Runoff and Soil Loss Data Center*, nos Estados Unidos e foi revisado por *Wischmeier e Smith (1965)*, os

quais fundamentados pelas pesquisas sobre processos erosivos, acrescentaram informações que possibilitaram estabelecer valores mais próximos dos reais.

Portanto, a EUPS permite a previsão da taxa média de erosão do solo para cada combinação de sistemas de cultivo e práticas de gestão com a sua associação a um tipo específico de solo, regime de chuvas e topografia (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A EUPS é a equação mais empregada para cálculo de erosão em termos médios anuais, correspondendo aos produtos de parâmetros básicos, considerando fatores ativos e passivos.

A equação universal por perda de solo pode ser utilizada para:

- Prever perdas de solo por erosão;
- Estimativa do aporte de sedimentos;
- Selecionar práticas de conservação do solo de tal forma que sejam mantidas as perdas dentro dos limites aceitáveis;
- Determinar os declives máximos que podem ser cultivados sob determinados manejos e tipos de solo.

Bertoni e Lombardi Neto (2010), apresentam a Equação 1, sendo calculada para um ano ou tempo definido:

$$A = R . K . L . S . C . P \quad (1)$$

Onde:

A= perda de solo por unidade de área, t/ha.ano;

R= fator erosividade da chuva, MJ.mm/ha.h.ano;

K= fator erodibilidade do solo, (ton.ha.h/MJ.ha.mm);

L= fator que leva em conta a distância ao longo da qual ocorre o escoamento superficial, adimensional;

S= fator que considera a declividade do terreno, adimensional;

C= fator que leva em conta o uso e manejo do solo, adimensional; e

P= fator que considera as práticas conservacionistas adotadas, adimensional.

Os modelos matemáticos de estimativa do aporte de sedimentos, tais como o InVEST, SWAT, HEC-RAS, e WEPP, têm sido muito utilizados na quantificação dos sedimentos gerados em bacias hidrográficas, considerando os fatores correspondentes à perda de solo.

O Modelo do InVEST computa a quantidade de sedimento erodido, baseando-se na equação da EUPS, e então, posteriormente calcula a proporção de perda de solo que atinge o exutório da bacia a partir da estimativa de um valor da taxa de transferência da bacia (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2017).

3.1.6 Taxa de Transferência de sedimentos – SDR

Conforme Bernal (2016), do total de sedimento erodido e transportado ao longo da bacia de drenagem, parte pode ser depositada no leito do rio, em bancos de areia, barras, em reservatórios.

A Sediment Delivery Ratio (SDR), ou taxa de transferência de sedimento, é definida como a proporção de sedimento que chega ao exutório da bacia em relação ao total de sedimento erodido na mesma bacia, conforme definido por Walling (1983) e apresentado na Equação a seguir:

$$SDR = \frac{Y}{E} \quad (2)$$

Onde:

SDR = Taxa de transferência de sedimentos;

Y = Sedimento produzido no exutório da bacia (t/ ano); e

E = Erosão total da bacia (t / ano).

Usualmente estimada a partir de medição da produção de sedimentos em um determinado ponto na malha de canais de uma bacia, posteriormente sendo dividida pela estimativa da erosão (derivado de métodos como a EUPS ou cálculos utilizando dados de campo). (KIRCHNER, 2004 apud FREITAS, 2018).

3.2 AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO

O assoreamento é um processo de sedimentação das partículas inorgânicas que são transportadas por um rio, sendo este evento algo que ocorre naturalmente e em maior quantidade em rios com baixa velocidade de fluxo, conforme Carvalho (2008). Assoreamento e erosão são dois processos diretamente proporcionais na dinâmica da bacia hidrográfica.

A barragem constitui um impedimento à passagem da maior parte das partículas para jusante, o que pode ocorrer com o escoamento pelo vertedouro e/ou pelos condutos. Assim, o reservatório se constitui num eficiente meio de retenção de sedimentos.

Segundo Silva e Wilson Jr. (2005), quando a descarga sólida aumenta, com a vazão líquida permanecendo constante durante um período de tempo, as tendências morfológicas do trecho são o alargamento das seções transversais, diminuição da profundidade média do trecho a jusante, aumento o comprimento dos meandros e da declividade do trecho com a diminuição da sinuosidade.

Rios em trechos de alta velocidade tendem a erodir o seu leito e margens, enquanto que nos trechos de baixa velocidade – como reservatórios, por exemplo – tende a ocorrer o assoreamento. A redução da correnteza é um dos principais impactos devido ao estabelecimento de um reservatório resultando em maior tendência à deposição de sedimentos. (CUNHA et al., 2013).

Outra consequência deste processo, que, além de modificar e deteriorar a qualidade da água, a fauna e a flora, provoca o decréscimo da velocidade da água

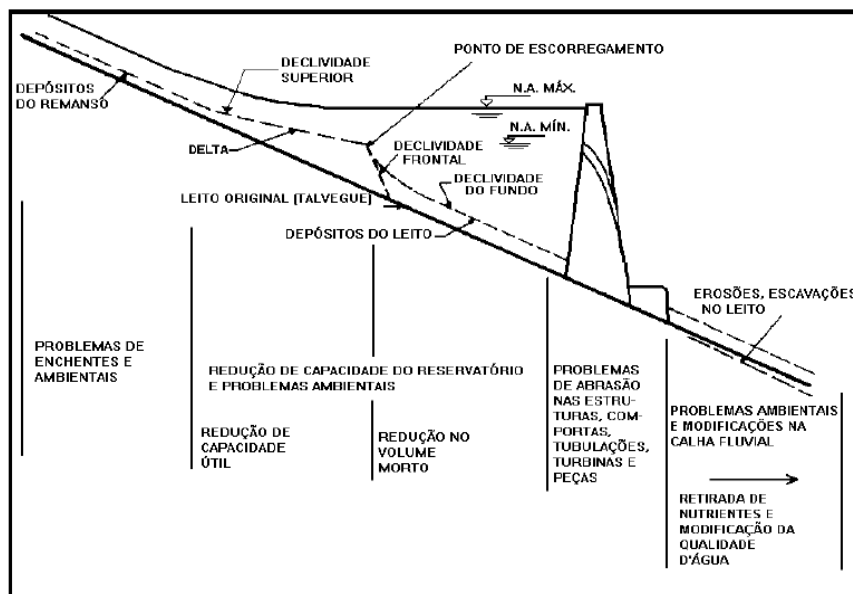
resultando em comprometimento na operação do reservatório, à medida que ele perde gradualmente sua capacidade de armazenamento d'água.

Nesse caso, mais água passará pelo vertedouro, reduzindo assim a regularização prevista para o aproveitamento. Com a diminuição do nível, é requerido um maior tempo de operação das máquinas para gerar energia e aproveitar a água, se solicitada maior geração. Em caso contrário, a água será perdida, não gerando a energia inicialmente planejada.

A partir de estudo realizado pela Eletrobrás/IPH (1994), pode-se concluir que a perda de capacidade de armazenamento dos reservatórios no Brasil é de aproximadamente 0,5% por ano. Essa taxa pode corresponder a perdas de capacidade de armazenamento de $2.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano, o que corresponde a um volume maior do que muitos dos médios reservatórios existentes. Por outro lado, constata-se que a erosão no país tem aumentado com o crescimento da população e do uso do solo (CARVALHO, 2008).

Outros problemas derivados da deposição de sedimentos podem ser observados na Figura 2, apresentando diversos impactos ambientais. Isso é verdadeiro tanto para pequenos quanto para grandes reservatórios, provocando o desequilíbrio tanto a montante quanto a jusante do barramento.

Figura 2 – Esquema de formação de depósitos de sedimentos nos reservatórios



Fonte: (CARVALHO, 2008).

São esperadas consequências tanto a montante quanto a jusante da barragem. Os principais problemas são:

- Perda de capacidade do reservatório: a gradual deposição de sedimentos vai reduzindo o volume do reservatório e sua capacidade de regularização;
- Deposição no delta: a maior parte dos depósitos ocorre na entrada do reservatório, causando redução no volume útil e outros efeitos como, por exemplo, a agradação da área do remanso, a qual vai se estendendo para montante, criando diversos problemas como dificuldade para navegação, inundações, danos a estruturas hidráulicas e pontes, facilidade para aumento da vegetação em áreas rasas e aparentes, levantamento do lençol freático etc;
- Abrasão: partículas com diâmetros maiores que 0,10 mm podem provocar abrasão em turbinas, máquinas e estruturas quando dotadas de grandes velocidades;
- Perda de energia: a redução do volume útil de uma hidrelétrica pelos depósitos na área do delta e margens tem como consequência a perda da sua capacidade de geração inicial;
- Tomadas d'água, válvulas de descargas e comportas: As estruturas hidráulicas podem sofrer danos e apresentar dificuldades de operação devido ao fluxo de sedimentos;
- Erosões, escavações no Leito: Modificações na calha fluvial do rio, retirada de nutrientes e modificação na qualidade d'água.

3.3 PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

Segundo Carvalho (2000b), a vida útil do reservatório termina quando o assoreamento passa a prejudicar a operação de usinas hidrelétricas. Isso ocorre

quando o sedimento depositado alcança a tomada d'água e passa a se escoar com a água, enquanto a altura de sedimentos se eleva até a obstrução total.

A influência do assoreamento nos reservatórios de usinas hidrelétricas está relacionada com a variação do seu volume útil, visto que este não se mantém constante no decorrer do tempo devido à deposição de sedimentos.

Quanto à vida útil do reservatório – tempo em que a altura dos sedimentos depositados atinge a tomada d'água, segundo apresentado por Carvalho (2008), o seu cálculo depende, entre outros fatores, do volume de sedimento retido em um reservatório. Para cálculo preliminar do assoreamento utilizam-se as seguintes expressões:

$$S = \frac{D_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} = \frac{365 \times Q_{st} \times E_r}{\gamma_{ap}} \quad (3)$$

$$T = \frac{V_{res}}{S} \quad (4)$$

Onde:

S: Volume de sedimento retido no reservatório, em m³/ano;

D_{st}: Deflúvio sólido total médio anual afluente ao reservatório, em t/ano;

E_r: Eficiência de retenção do sedimento afluente ao lago (adimensional);

γ_{ap}: Peso específico aparente médio dos depósitos, em t/m³;

Q_{st}: Descarga sólida total média afluente ao reservatório, em t/dia;

T: Tempo de assoreamento total do reservatório, em anos; e

V_{res}: Volume do reservatório (total, volume morto ou qualquer), em m³.

Com a equação apresentada, aponta que para aumentar o tempo de vida útil do reservatório, deve-se diminuir o volume de sedimentos retidos, visto que são grandezas inversamente proporcionais.

Destaca-se que os valores acima são variáveis com o tempo. A descarga sólida varia com o aumento da erosão na bacia e conseqüentemente o transporte de sedimentos também aumenta. A eficiência de retenção do reservatório diminui à medida que aumentam os depósitos. O peso específico aparente médio se altera com a compactação ao longo do tempo. Com o aumento do depósito o volume do reservatório vai diminuindo. (CARVALHO, 2000b).

Conforme Carvalho 2008, a descarga sólida total é o valor necessário na grande maioria dos estudos sedimentológicos. A medição direta dispõe de medição de dados nos rios, levantamentos topobatimétricos de reservatório e a correlação da descarga líquida com a turbidez. (LOPES, 2010 apud FREITAS, 2018).

Contudo, há também medições indiretas que são feitas pelos seguintes métodos principais:

- Pela soma do material de descarga no material fino com a descarga do material de leito;
- Por processo de cálculo, pelo método modificado de Einstein, exigindo amostragens e análise de sedimentos em suspensão no leito;
- Por levantamento topobatimétrico do reservatório e cálculo do volume assoreamento, em comparação aos dados antigos, que leve em consideração o sedimento que sai com o escoamento da água a jusante.

Pela soma da descarga em suspensão com a descarga de arrasto e mais uma parcela que leva em conta a descarga não amostrada; essa parcela é obtida a partir de estudos de material de suspensão e de fundo, que permitem obter os coeficientes de correlação

Carvalho, 2000a avaliou o processo de assoreamento dos reservatórios da Usina Hidrelétrica Itiquira, localizada no Estado de Mato Grosso, considerando

dados de descarga sólidas medidos no local, indicada para pequenos reservatórios, obteve-se uma vida útil de 12 anos.

Dessa forma, o autor concluiu que a vida útil do aproveitamento seria muito curta, o que poderia, até mesmo, inviabilizar o empreendimento, face à necessidade de dragagens que possibilitassem a sua continuidade operacional, por este fato, foi recomendado estudos para prever o controle de sedimento, além da operação periódica do descarregador de fundo.

A Europa também apresenta estudos interessantes na área de sedimentação de reservatórios. Porém, como a matriz energética europeia (salvo algumas exceções, como Noruega e Suécia) não depende substancialmente de fontes hidráulicas, as pesquisas e estudos nesta área são menores quando comparadas a países que têm sua matriz energética predominantemente baseada em fontes hidráulicas. Outro fato que deve ser destacado, é que em áreas de clima temperado, a sedimentação dos reservatórios ocorre mais lentamente do que em áreas de clima tropical. Um estudo realizado no Instituto de Meteorologia e Gestão Hidrológica em Varsóvia (Polônia) revisou as taxas de sedimentação de 19 reservatórios da Europa Central e constatou que a taxa média de sedimentação dos mesmos era de 0,51% ao ano. (GLYMPH, 1973 apud MIRANDA, 2015).

3.3.1 Eficiência de retenção do sedimento afluyente ao lago (Er)

A eficiência de retenção é uma grandeza que representa a razão entre o sedimento depositado e o fluxo total do sedimento afluyente. Esse parâmetro depende da velocidade do escoamento no reservatório, da velocidade de sedimentação dos sedimentos e da geometria do reservatório. (COSTA, 2012).

As metodologias utilizadas para a estimativa da eficiência de retenção foram determinadas empiricamente, a partir de medições dos depósitos de diversos reservatórios (ICOLD, 1989; STRAND, 1974).

Conforme Carvalho (2008), para estudos de reservatórios com vários anos de operação os resultados de descarga sólida afluyente com a efluente permitem a verificação da Eficiência de Retenção em relação às curvas usuais, considerando

que o tamanho do reservatório é um fator importante para este cálculo. Os métodos mais conhecidos, como Churchill e Brune, são usados conforme esse parâmetro, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação do reservatório para cálculo de E_r

Porte do Reservatório	Classificação do volume (m ³)	Cálculo de E_r
Pequeno	< 10.10 ⁶	Churchill
Médio	10 - 100.10 ⁶	Brune
Grande	> 100.10 ⁶	Brune

Adaptado de Carvalho et al. (2000)

3.3.2 *Peso específico aparente médio dos depósitos, em t/m³ (γ_{ap})*

O peso específico dos sedimentos depositados nos reservatórios é a relação entre o peso seco do material sedimentado e o volume ocupado por este depósito. Sua determinação é necessária para a transformação da descarga sólida retida em volume sedimentado. A densidade do depósito do sedimento depende da quantidade de espaços vazios ocupados por água, o que é influenciado pelo tamanho do grão, distribuição granulométrica e pela consolidação sofrida pelo sedimento, que representa a relação direta entre a operação do reservatório e seu grau de exposição (KOELZER; LARA, 1958 apud MAIA, 2006).

O peso específico aparente dos depósitos é diferente do peso específico das partículas que os compõem devido aos vazios entre as partículas sedimentadas e é variável com o tempo devido à compactação do peso da água e do próprio sedimento.

Conforme Caralho (2000a), o peso específico aparente do depósito pode ser calculado ou estimado. Lara e Pemberton chegaram à conclusão através de pesquisas com amostragem em reservatórios existentes, que o peso específico aparente dos depósitos de sedimento pode ser calculado segundo o tipo de operação desse reservatório, do grau de compactação dos sedimentos e da granulometria, fatores esses, que mais influenciam na consolidação dos depósitos.

Outros fatores de menor influência podem ser citados, como densidade de correntes de sedimento no reservatório, declividade do talvegue do curso d'água afluente e o efeito da vegetação na área das cabeceiras do reservatório.

3.3.3 Descarga Sólida Total

A descarga sólida pode ser medida de forma direta, por meio de medições sedimentométricas e posterior análise em laboratório, para obter de forma precisa a análise quantitativa do sedimento.

No entanto, quando não há medições consolidadas da descarga sólida total, pode-se estimar de forma indireta por meio de medições de Descarga líquida. Baseado no método indireto, Coby (1957) desenvolveu pelo menos três métodos para cálculo de descarga sólida total baseado no método modificado de Einstein.

Para determinar a quantidade da descarga sólida total é necessário determinar a concentração de sólidos em suspensão, a vazão líquida, a profundidade média do leito analisado, a velocidade média da corrente de água, a largura do leito e a área da seção transversal. (BRAGA, 2012).

O método utiliza basicamente três ábacos, além de dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração medida de sedimentos em suspensão. Desse modo, a descarga sólida total é calculada pelas Equações 5, 6 e 7. (Carvalho, 2008; Santos *et al.*, 2001; Miranda, 2014).

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{sm} \quad (5)$$

$$Q_{st} = 0,0864 \cdot Q \cdot C'_s \quad (6)$$

$$Q_{nm} = q'_{nm} \cdot k \cdot L \quad (7)$$

Onde:

Q_{st} : descarga s3lida total (t/d);

Q_{sm} : descarga s3lida medida (t/d);

Q_{nm} : descarga s3lida n3o medida (t/d);

Q : descarga l3quida (m^3/s)

C_s : concentra33o de sedimento em suspens3o medida (ppm);

L : largura do rio (m);

k : fator de corre33o (adimensional).

3.4 MONITORAMENTO E CONTROLE DE SEDIMENTOS EM RESERVAT3RIOS

O monitoramento e todo o processo de medi33es sedimentom3tricas visam a verifica33o de um poss3vel assoreamento e as necessidades de controle de sedimentos com a inten33o de mitigar seus efeitos. Programas de preven33o de sedimenta33o do reservat3rio s3o os de maior import3ncia, sendo as medidas corretivas efetuadas apenas em casos onde n3o h3 outra alternativa (ANEEL, 2000).

Segundo Carvalho (2008), as medidas preventivas s3o mais eficientes para o controle de sedimentos em reservat3rios, uma vez que as medidas procuram controlar a eros3o na bacia e evitar que o sedimento entre o sistema fluvial para se depositar no reservat3rio.

Controlar a sedimenta33o de um reservat3rio traz v3rios benef3cios como por exemplo, a sele33o do local do reservat3rio (na fase de invent3rio e projetos), pois sua constru33o influencia diretamente na taxa de assoreamento do reservat3rio e controle de eros3o da bacia – m3todo mais eficaz no controle de sedimentos, por3m de dif3cil aplica33o, entre outros.

3.4.1 Medidas Preventivas

Segundo Carvalho (2008), as medidas preventivas são mais eficientes para o controle de sedimentos em reservatórios, uma vez que as medidas procuram controlar a erosão na bacia e evitar que o sedimento entre o sistema fluvial para se depositar no reservatório.

Conforme CIGB (ICOLD, 1989) o controle de sedimentos precisa ser iniciado nas cabeceiras dos rios, a alta bacia, que tem grande contribuição de escoamento, mas pequena proporção de carga sólida. Preservar as florestas nessas regiões é de suma importância tanto na fase de inventário, viabilidade, projeto e operação da barragem.

Em suma, as medidas preventivas podem ser enumeradas, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Medidas preventivas do controle de sedimentos e do assoreamento do reservatório

Fases	Medidas Preventivas	Controle
Inventário e Viabilidade	Seleção do local do aproveitamento	Se mais de um local for disponível, selecionar aquele que tiver menos aporte de sedimentos
Projeto	Projeto do reservatório	Prever volume morto adequado, prever descarregador de fundo
Operação	Controle de erosão na bacia	Conservação e manejo do solo na agricultura
Operação	Controle de erosão nos cursos d'água e margens de reservatórios	Controle de erosão nas calhas e desbarrancamentos

Fonte: ANEEL, 2000b. (Adaptado).

3.4.2 Medidas Corretivas

As medidas corretivas, geralmente são adotadas em condições críticas, quando chega a uma condição de dificultar a operação, com o objetivo de amenizar os efeitos causados pelos sedimentos, já que estão depositados no reservatório.

Segundo o *International Commission on Large Dams* - ICOLD (1989), as medidas corretivas são adotadas quando os depósitos de sedimentos influenciam ou comprometem a operação ou função dos reservatórios, ou as estruturas e as obras

hidráulicas. As medidas visam remediar os problemas causados pelos depósitos de sedimentos quando estes afetam a vida útil do reservatório.

A retirada de sedimentos pode ser realizada por estruturas hidráulicas, através de descarga ou comporta de fundo, podendo ser adotada para reduzir a quantidade de sedimentos depositados no pé da barragem.

Outra medida corretiva, é a dragagem de sedimentos, uma das principais técnicas mais usuais para a remoção de focos de assoreamento. A dragagem consiste na remoção de sedimentos depositados através de um bombeamento mecânico sugando os sedimentos. A dragagem é adotada em situações extremas, pois, além de onerosa, essa tecnologia, deve ter um planejamento adequado sob pena de agravar ou simplesmente transferir os problemas para outros trechos.

No Quadro 3 apresenta-se as medidas corretivas do controle de sedimento e assoreamento do reservatório.

Quadro 3 - Medidas preventivas do controle de sedimentos e do assoreamento do reservatório

Medidas Corretivas	
Remoção do sedimento do reservatório	Dragagem
	Obras de derivação by-pass
	Sifonagem
	Descarregador de Fundo
Alteamento da barragem	Dimensionar adequadamente, para aumentar o nível e o espelho d'água

Fonte: ANEEL, 2000b. (Adaptado).

3.4.3 Resolução Conjunta ANA / ANEEL Nº 03

Com o objetivo de ampliar o escopo do monitoramento dos recursos hídricos do país, foi elaborado pela Agência Nacional de Águas – ANA e a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL a Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03, de 10 de agosto de 2010. Essa foi a primeira Normativa conjunta entre as agências reguladoras, e teve o importante papel de induzir, em termos de responsabilidade ambiental, o estabelecimento de serviços de monitoramento ambiental por entidades utilizadoras de recursos hídricos para a geração de energia hidrelétrica. Esta Resolução completou 10 anos de vigência, e muitos resultados já foram alcançados.

A Resolução Conjunta estabelece a quantidade de estações que devem ser instaladas e operadas pelo concessionário ou autorizado do empreendimento hidrelétrico, e os tipos de monitoramento, de acordo com as características da usina. Porém, em todos os casos, as medições fluviométricas, limnimétricas e pluviométricas deverão ser automáticas, com transmissão horária dos dados, e a frequência das medições sedimentométricas e de qualidade da água deverão ser trimestrais.

Estabelece também que devem ser atualizadas as curvas cota-área-volume para fins de revisão da estimativa da vida útil do aproveitamento hidrelétrico das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, de sua capacidade de geração de energia em certos períodos, dentre outras variáveis. Distorções na determinação do volume, tanto no que tange ao volume morto quanto no volume útil, impactam, diretamente o gerenciamento do reservatório a capacidade de geração de energia e as receitas geradas.

Esta Resolução Conjunta foi publicada levando em consideração a necessidade de dados consubstanciados sobre os regimes de operação dos reservatórios de aproveitamento hidrelétricos, que possam subsidiar a tomada de decisão quanto às atividades de fiscalização, regulação, operação e mediação no setor elétrico.

A Tabela 2 prevista no parágrafo 3º do artigo 2º da Resolução Conjunta, apresenta a relação estabelecida entre a área de drenagem incremental, a tipologia e a quantidade de estações de monitoramento a serem instaladas em cada empreendimento hidrelétrico.

Tabela 2 – Quantidade de estações de monitoramento junto à Área de Drenagem Incremental

Tipo de Monitoramento	Área de Drenagem Incremental				
	De 0 a 500 km ²	De 501 a 5.000 km ²	De 5.001 a 50.000 km ²	De 50.001 a 500.000 km ²	Acima de 500.000 km ²
Pluviométrico	1	3	4	6	7
Limnimétrico	1	1	1	1	1
Fluviométrico	1	3	4	6	7
Sedimentométrico	1	2	2	3	3

Fonte: Resolução Conjunta Nº 03

Na implementação da Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010 as empresas do Setor Elétrico devem enviar à ANA, para cada usina hidrelétrica:

- Projeto de Instalação de Estação Hidrométrica;
- Relatório de Instalação de Estações Hidrométricas;
- Relatórios Anuais de Operação das Estações Hidrológicas;
- Dados Hidrológicos Coletados na vigência da Resolução ANEEL nº 396/1998;
- Relatório Anual de Consistência de Dados Pluviométricos e Fluviométricos; e
- Levantamento das Curvas Cota-Área-Volume das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS.

3.4.4 Batimetria em Reservatórios

Dentre as técnicas para quantificar o volume de água em um corpo d'água, tem-se a batimetria, que consiste em levantar dados referenciados ou georreferenciados da profundidade ou cota da superfície do fundo de um reservatório ou seção de um rio. No caso de reservatórios são levantadas quantas seções forem necessárias. O levantamento topobatimétrico do reservatório pelo método do levantamento de seções transversais é o mais largamente usado para médios e grandes reservatórios (*BRUK*, 1985 apud *CARVALHO* 2000b).

O levantamento compreende a parte terrestre e a parte submersa interessadas aos estudos. O que se faz é a comparação entre dois levantamentos efetuados em épocas diferentes, mesmo que seja com o uso do mapa de interpretação aerofotogramétrica da fase de planejamento. As referências topográficas têm de ser as mesmas. Dentre um dos produtos do levantamento batimétrico é a verificação da porcentagem de sedimento depositado no reservatório, no volume morto e o volume perdido na área do volume útil.

O custo oneroso de um levantamento é um fator de grande influência na frequência de levantamentos de reservatórios. A disponibilidade de recursos para esses trabalhos é geralmente escassa, principalmente porque o depósito de sedimento fica submerso (ANEEL, 2000a).

Considerando que o custo do levantamento seja justificado em função de uma atualização de verificação da capacidade do reservatório e do volume de assoreamento, pode-se considerar o critério indicado na Tabela.3 Fica evidente que em reservatórios com grande taxa de depósito de sedimentos são realizados levantamentos mais frequentes (CARVALHO et al., 2000).

Tabela 3 - Frequência desejável para levantamentos topobatimétricos de reservatórios

Porte do Reservatório	Classificação em volume (10⁶ m³)	Frequência de levantamento
Pequeno	< 10	2 anos
Médio	Entre 10 e 100	5 anos
Grande	> 100	10 anos

Nota: A classificação aí apresentada não é rígida, podendo ter diferentes conceitos em outros países

Fonte: CARVALHO et al., 2000

3.4.4.1 Curva Cota-Área-Volume

Os reservatórios atuam como verdadeiros filtros de sedimentos e iniciam assim o seu processo de assoreamento. Com o passar do tempo, o acúmulo de sedimento muda o seu relevo de fundo, não sendo condizente com o levantamento realizado na fase de pré-enchimento, sendo necessária a reavaliação destes dados.

Dessa forma a Curva Cota-Área-Volume (CAV) precisa ser atualizada de tempos em tempos, pois fornece informações de volume armazenado no reservatório de acordo com a profundidade, ou elevação quanto a área do reservatório (MATOS, 2009). Portanto, a curva CAV de um reservatório é uma informação fundamental no que concerne à estudos sedimentológicos, tanto na fase de projetos e quanto na fase de operação do reservatório, para a estimativa de vida útil do reservatório.

A elaboração da Curva CAV deve ser realizada com base no levantamento batimétrico nos reservatórios. Para comparação traçam-se também as curvas

originais, podendo obter informações importantes relacionado ao volume de sedimentos depositados ao longo do período analisado.

A curva Cota-Área-Volume servirá de subsídio para o Agente fiscalizador para avaliar a necessidade da realização de medidas preventivas e corretivas e também estudos de vida útil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 UHE OURINHOS

A UHE Ourinhos pertencente à Votorantim Energia, está localizada na bacia hidrográfica do rio Paranapanema, no município de Ourinhos, no Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas do empreendimento são 23° 4'6.93"S (Latitude) e 49°50'16.67"O (Longitude).

Está implantada no início do trecho médio do rio Paranapanema, a jusante da UHE Chavantes. No local da barragem a área de drenagem é de aproximadamente 395,70 km². O perímetro da bacia é de cerca de 130 km.

O empreendimento possui potência instalada de 44,10 MW e seu reservatório tem área de 4,44 km² e volume de 20,82 hm³. A Figura 3 abaixo apresenta a UHE Ourinhos.

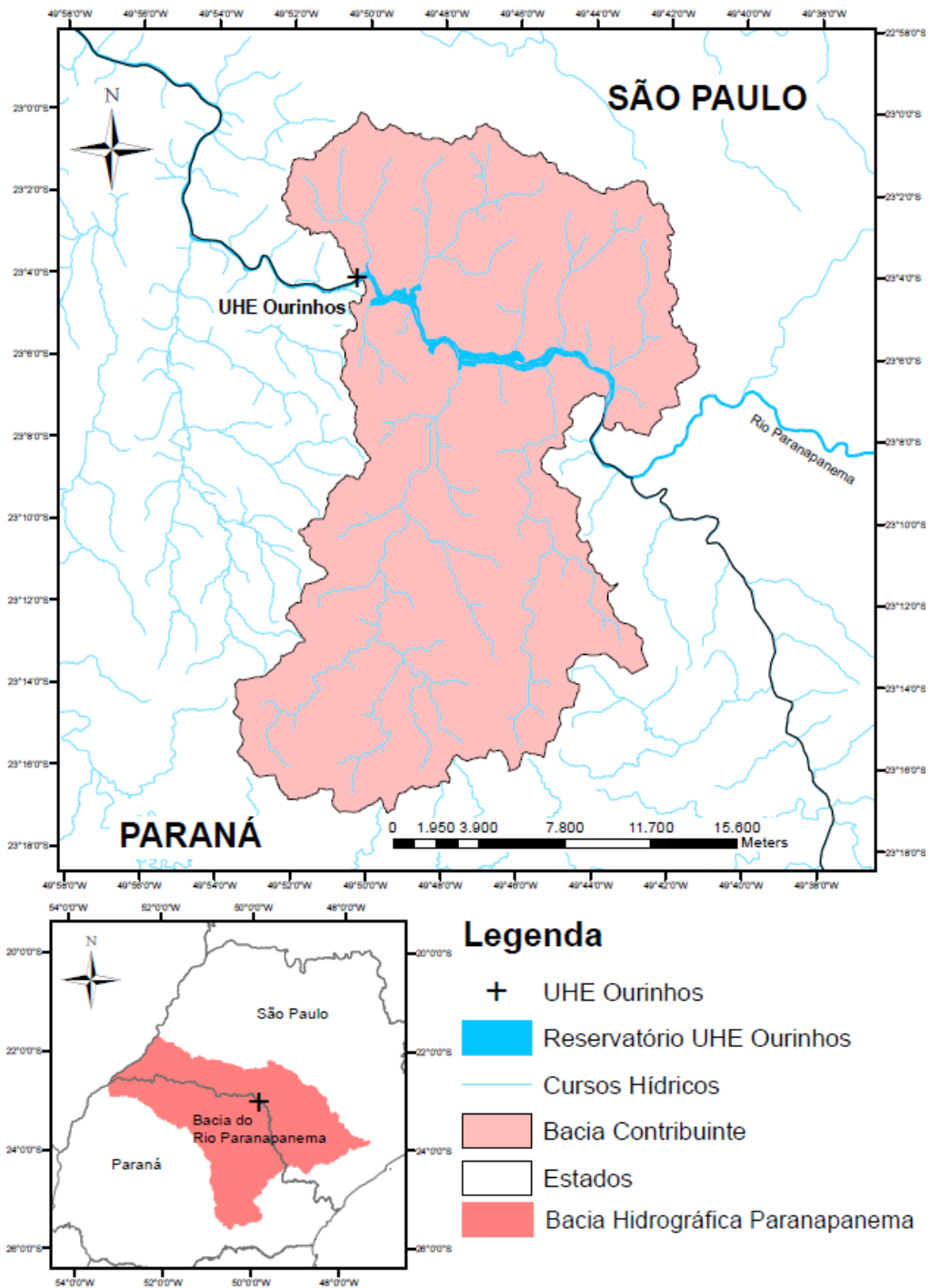
Figura 3 – UHE Ourinhos



Fonte: Google Earth, 2021,

No trecho das nascentes até a barragem da UHE Ourinhos o rio Itararé é o principal afluente, se juntando ao rio Paranapanema pela margem esquerda no reservatório da UHE Chavantes. A partir do lago de Chavantes passa ser o divisor natural dos estados do Paraná e São Paulo. Na Figura 4 está apresentada a bacia hidrográfica contribuinte do rio Paranapanema.

Figura 4 – Bacia hidrográfica contribuinte e localização da UHE Ourinhos



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Os dados do reservatório foram extraídos da batimetria e Ficha técnica da UHE Ourinhos, foram disponibilizados na pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019). A Tabela 4 apresenta as informações obtidas que irão subsidiar o cálculo da vida útil do reservatório.

Tabela 4 – Informações do reservatório UHE Ourinhos

Dados	
Nível Max. Maximorum (m)	399,00
Nível d'água máximo normal (m)	398,00
Volume no NA máx. normalmente (hm ³)	25,43
Volume útil (hm ³)	20,82
Área (km ²)	4,33
Vazão Média de Longo Termo (m ³ /s)	368,06

Fonte: Disponibilizado pela ANA.

4.1.1 Características Físicas

Os índices morfométricos foram calculados e adaptados utilizando a metodologia proposta por Christofletti (1969). Nessa etapa, foram escolhidos alguns índices que servem para verificar a suscetibilidade a enchentes.

Frente aos parâmetros fisiográficos apresentados na Tabela 5 então, considera-se a bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos como pouco suscetível a enchentes, em condições normais de precipitação, devido à comprovação da sua forma alongada.

Tabela 5 - Caracterização Fisiográfica da Bacia Hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos

Parâmetros de Entrada	
Área de Drenagem – A (km ²)	395,70
Perímetro da Bacia – P (km)	130,00
Comprimento do Canal Principal – L (km)	22,03
Cota Nascente	699,00
Cota Foz	398,00
Parâmetros Resultantes	
Desnível do Canal Principal (m)	301,00
Declividade Média (m/m)	0,0137
Largura Média (km)	17,96
Fator de Forma $Kf = \frac{A^2}{L}$	0,023
Fator de Compacidade $Kc = \frac{P}{\sqrt{A}}$	1,83
Índice de Circularidade $Ic = 12,57 \cdot \frac{12,57 \cdot A}{P^2}$	0,29

Além do valor da área de drenagem determinada pela metodologia apresentada, foram extraídas outras informações como o comprimento e desnível do canal principal e o perímetro da bacia, permitindo, assim, determinar algumas características fisiográficas (como fator de forma, de compacidade e de circularidade).

A seguir será apresentado as equações utilizadas para conhecimento das características da bacia.

Fator de forma (***Kf***): Esse coeficiente dá uma ideia da tendência da bacia a cheias e, a princípio, comparando-se duas bacias, aquela de maior fator de forma estaria mais propensa a cheias do que a outra.

O Fator de Compacidade (***Kc***) é definido como a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de mesma área da bacia. Se ***Kc*** = 1, a forma da bacia é um círculo, assim, quanto maior o valor deste coeficiente, menor é a sua tendência a cheias.

O Índice de Circularidade (***Ic***) tende ao valor unitário à medida que a bacia se aproxima da forma circular.

Com base na análise morfométrica pôde-se concluir que a bacia é pouco susceptível a enchentes em condições normais de precipitação, devido ao fator de forma (***Kf***) apresentar fator de forma baixo (0,023), portanto, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a extensão da bacia. Quanto ao coeficiente de compacidade (***kc***) calculado foi de 1,83 demonstrando ser susceptível ao escoamento superficial por ser mais alongada.

Já o índice de circularidade (***Ic***), calculado em 0,29 caracteriza a forma da bacia como alongada, confirmando o coeficiente de compacidade (***Kc***) determinado anteriormente. Seu valor se distancia da unidade, evidenciando um menor risco de grandes cheias, e topografia favorável ao escoamento superficial.

4.1.2 Características Pedológicas

A descrição das classes de solos presentes na bacia contribuinte da UHE Ourinhos, é conceituada através das definições propostas pela EMBRAPA (2018).

a) Argissolos

Tratam-se de solos constituídos por material mineral, que tem como característica diferencial, a presença de argila de atividade baixa e horizonte B textural (Bt), imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial. Possuem profundidades variadas, coloração normalmente avermelhadas ou amareladas, sendo forte a imperfeitamente drenados.

b) Latossolos

Compreendem solos minerais não hidromórficos com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial. São constituídos de quartzo, óxidos de ferro e alumínio, argila de baixa mobilidade e minerais resistentes ao intemperismo. Variam de fortemente a bem drenados, altamente intemperizados, profundos e evoluídos.

c) Neossolos

São solos constituídos por material mineral ou por matéria orgânica. São rasos e pouco evoluídos. Não possuem o horizonte B. Nesta classe estão incluídos os Litossolos, Solos Litólicos Regossolos, Solos Aluviais e Areias Quartzosas.

c) Nitossolos

Os Nitossolos são solos constituídos de material mineral, com 350 g kg⁻¹ ou mais de argila, inclusive no horizonte A, que apresentam horizonte B nítrico abaixo do horizonte A. O horizonte B ítico apresenta argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B dentro de 150 cm da superfície do solo.

O mapa pedológico, representado pela Figura 5, apresenta os tipos de solo da bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos. A região da bacia apresenta de maneira geral 4 tipos de classes, conforme apresentado na Tabela 6. A predominância é o Latossolo (44,30%).

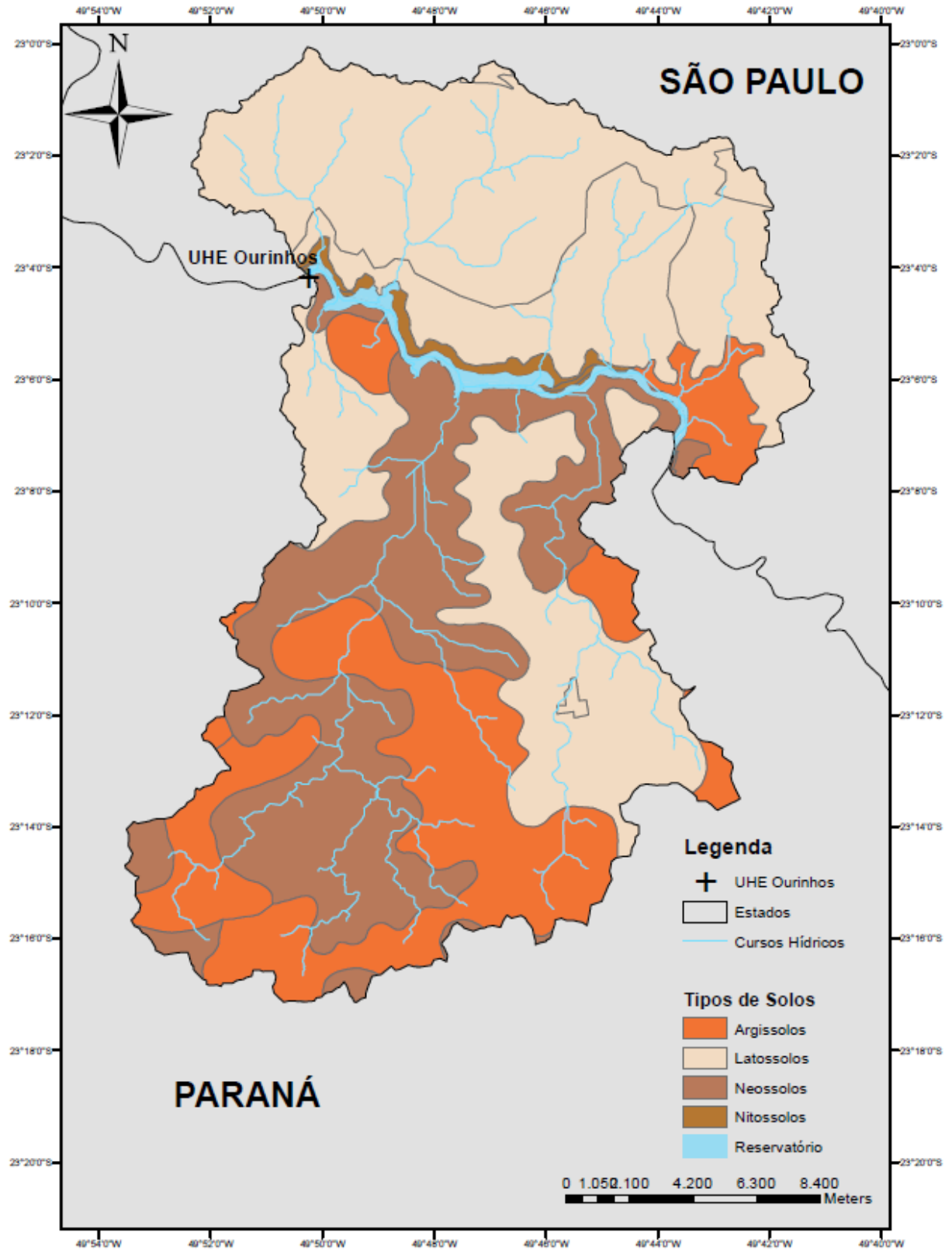
Tabela 6 – Tipos de Solo na Bacia contribuinte da UHE Ourinhos.

Solo	Área (km²)	Porcentagem
Neossolo	112,4	28,41%
Latossolo	175,3	44,30%
Argilossolo	80,4	20,32%
Nitossolo	27,6	6,97%
Total	395,7	100,00%

Fonte: Próprio Autor, 2021.

O conhecimento das Classes do Solo é determinante para estabelecer o índice de erodibilidade dos solos (Fator K), bem como, para a espacialização deste fator na área de estudo.

Figura 5 – Mapa Pedológico



Fonte: Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA), 2021.

4.2 ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS

4.2.1 Modelo InVEST

O modelo integrado de valoração dos serviços ecossistêmicos e suas perdas e ganhos para taxa de transferência de sedimentos (InVEST SDR 3.8.4) é baseado em Sistemas de Informações Geográfica (SIG), aceitando dados de entrada *raster* para o clima, solo, topografia e uso e cobertura do solo (HAMEL, 2015). O modelo realiza a estimativa da perda de solo, da quantidade de retenção de sedimentos e a taxa de transferência de sedimento para cada pixel contido nos dados matriciais (Raster).

Para tal, seguindo a metodologia proposta pelos desenvolvedores, o modelo primeiro computa a quantidade de sedimento erodido, baseando-se na equação da EUPS, e então, posteriormente calcula a proporção de perda de solo que atinge o exutório da bacia a partir da estimativa de um valor de SDR (NATURAL CAPITAL PROJECT, 2017).

A taxa de entrega de sedimentos (SDR) é a proporção de perda de solo que realmente atinge o rio. O módulo de entrega de sedimentos trabalha na resolução espacial da elevação digital de entrada varredura do modelo (MDE).

O modelo recebe influência de diversos fatores geomorfológicos e ambientais, como padrão de drenagem, inclinação do terreno, uso e cobertura do solo, características do canal e variabilidade temporal, entre outros, que também são parâmetros resultantes secundários utilizados no cálculo do InVEST.

A quantidade anual de perda de solo para cada pixel (pixel *i*) é dada pela equação da EUPS (Equação 8).

$$USLE_i = R_i \cdot K_i \cdot L_i \cdot S_i \cdot C_i \cdot P_i \quad (8)$$

Onde:

$EUPS_i$ = perda de solo para o pixel i (ton/ha.ano);

R_i = erosividade da chuva para o pixel i (MJ.mm/ha.ano);

K_i = erodibilidade do solo para o pixel i (ton.ha.h/MJ.ha.mm);

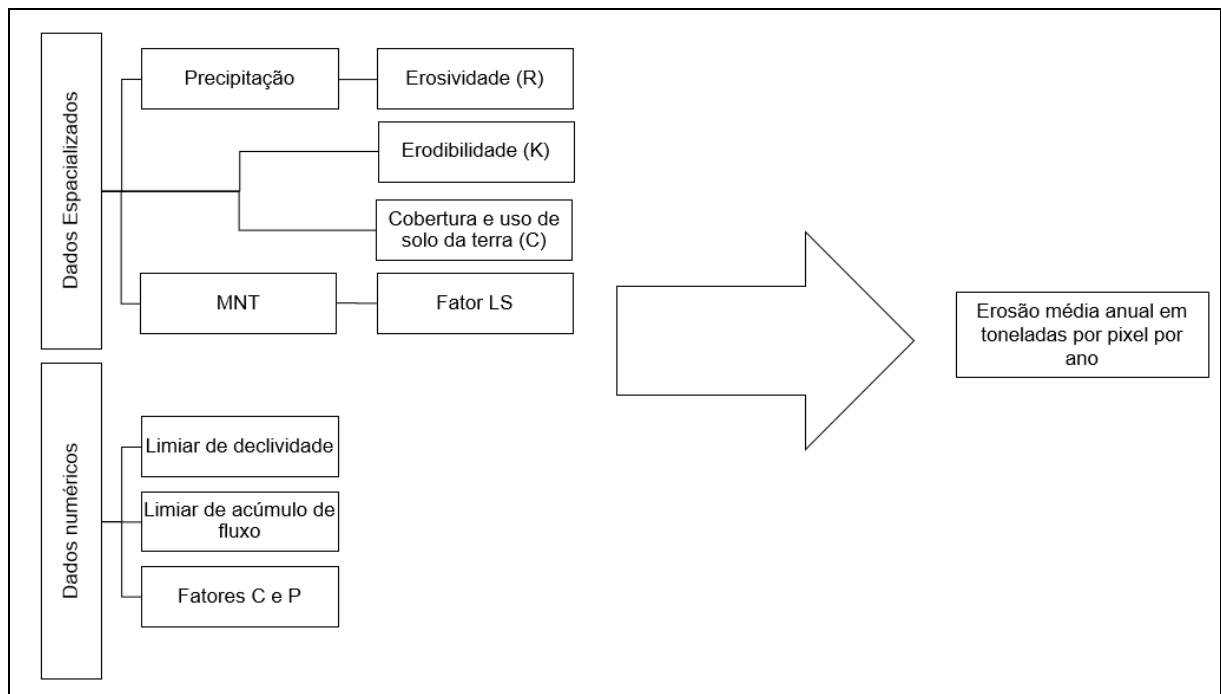
LS_i = fator de comprimento e declividade para o pixel i ;

C_i = fator de cobertura do solo para o pixel i ;

P_i = fator de práticas conservacionistas para o pixel i .

O InVEST, utiliza uma interface em GIS. Desta forma, Thompson e Fidalgo (2013) elaboraram um fluxograma, apresentado na Figura 6, representativo das feições necessárias ao emprego do cálculo da EUPS no modelo InVEST.

Figura 6 – Representação esquemática dos dados empregados para a estimativa de perda de solo por erosão utilizando o programa InVEST



Fonte: Tompson; Fidalgo (2013) adaptado.

Os parâmetros e dados de entrada necessários precisam ser alimentados nos formatos shapefile (.shp) e raster (.tif), com 5 metros de resolução espacial.

Os fatores que compõem a Equação 11 são determinados pelos dados de entrada relacionados a área de estudo, necessários à execução do software InVEST (Quadro 4).

Neste trabalho, utilizaram-se valores encontrados na literatura para a estimativa dos fatores R_i , K_i e C_i .

Quadro 4 - Banco de dados a ser inserido no software InVEST

Dados de Entrada	Descrição
Modelo Digital de Elevação (MDE)	Mapa Raster com o valor de elevação para cada célula
Índice de Erosividade da Chuva (R)	Mapa raster com o valor do índice de erosividade para a região (MJ.mm/ha.ano). Valor que depende da intensidade da chuva para a região
Erodibilidade do Solo (K)	Mapa raster com o valor de erodibilidade ($Mg\ ha\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$) para cada tipo de solo. Esta erodibilidade é determinada pelo potencial de desagregação das partículas constituintes do solo.
Uso e Cobertura do Solo	Mapa raster com os usos e coberturas da região de estudo
Bacias Hidrográficas de Interesse (Watersheds)	Mapa com a delimitação das sub-bacias hidrográficas, que serão analisadas quanto à produção e retenção de sedimentos para um determinado ponto de interesse
Tabela Biofísica	Tabela com os usos e coberturas dos solos com seus respectivos fatores relativos ao potencial de retenção de sedimentos e referidas práticas conservacionistas.

Fonte: Zanella 2016, adaptado.

A classificação proposta pela Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO e apresentada por Riquier (1984) encontram-se valores de degradação referentes a erosão hídrica poderiam ser classificados conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Classificação da erosão

Classes	Erosão Hídrica (t/ha.ano)
I - Nula a pequena	Até 10
II - Moderada	10 a 15
III - Forte	50 a 200
IV - Muito Forte	> 200

Fonte: Riquier (1984).

4.2.2 Dados de Entrada para o InVEST

O modelo InVEST utiliza nas predições do aporte de sedimento (Descarga Sólida Total) a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), conforme citado pelos autores Thompson e Fidalgo (2013).

A interface utilizada no InVEST, com os dados de entrada utilizados na simulação, pode ser observada na Figura 7. Desse modo, verifica-se que o programa resgata informações de um banco de dados (“workspace”) previamente processado em outro software de processamento de informações geográficas (SIG) que será apresentado nos itens subsequentes.

Figura 7 – Dados de Entrada no Módulo SDR no Software InVEST

The screenshot shows the 'Sediment Delivery Ratio Model (SDR): loaded from autosave' window in InVEST version 3.8.4. The interface includes a menu bar (File, Edit, Development, Help) and a toolbar with a refresh icon and links for 'Model documentation' and 'Report an issue'. The main area lists 14 input parameters, each with a green checkmark, a text input field, and an information icon (i). A 'Run' button is located at the bottom right.

Parameter	Value
Workspace	VIMENTO/07. InVEST/DADOS DE ENTRADA/FINAL
Results suffix (optional)	
Digital Elevation Model (Raster)	DE ENTRADA/MODELO (15.05)/MDE_OURINHOS.tif
Rainfall Erosivity Index (R) (Raster)	S DE ENTRADA/MODELO (15.05)/Fator_R_Final.tif
Soil Erodibility (Raster)	DADOS DE ENTRADA/MODELO (15.05)/fator_K1_.tif
Land-Use/Land-Cover (Raster)	DADOS DE ENTRADA/MODELO (15.05)/Uso_Solo.tif
Watersheds (Vector)	/07. InVEST/DADOS DE ENTRADA/SHP/bacia5.shx
Biophysical Table (CSV)	S DE ENTRADA/MODELO (15.05)/Tabela_USLE.csv
Threshold Flow Accumulation	1000
Drainages (Raster) (Optional)	
Borselli k Parameter	2
Borselli IC0 Parameter	0.5
Max SDR Value	0.8

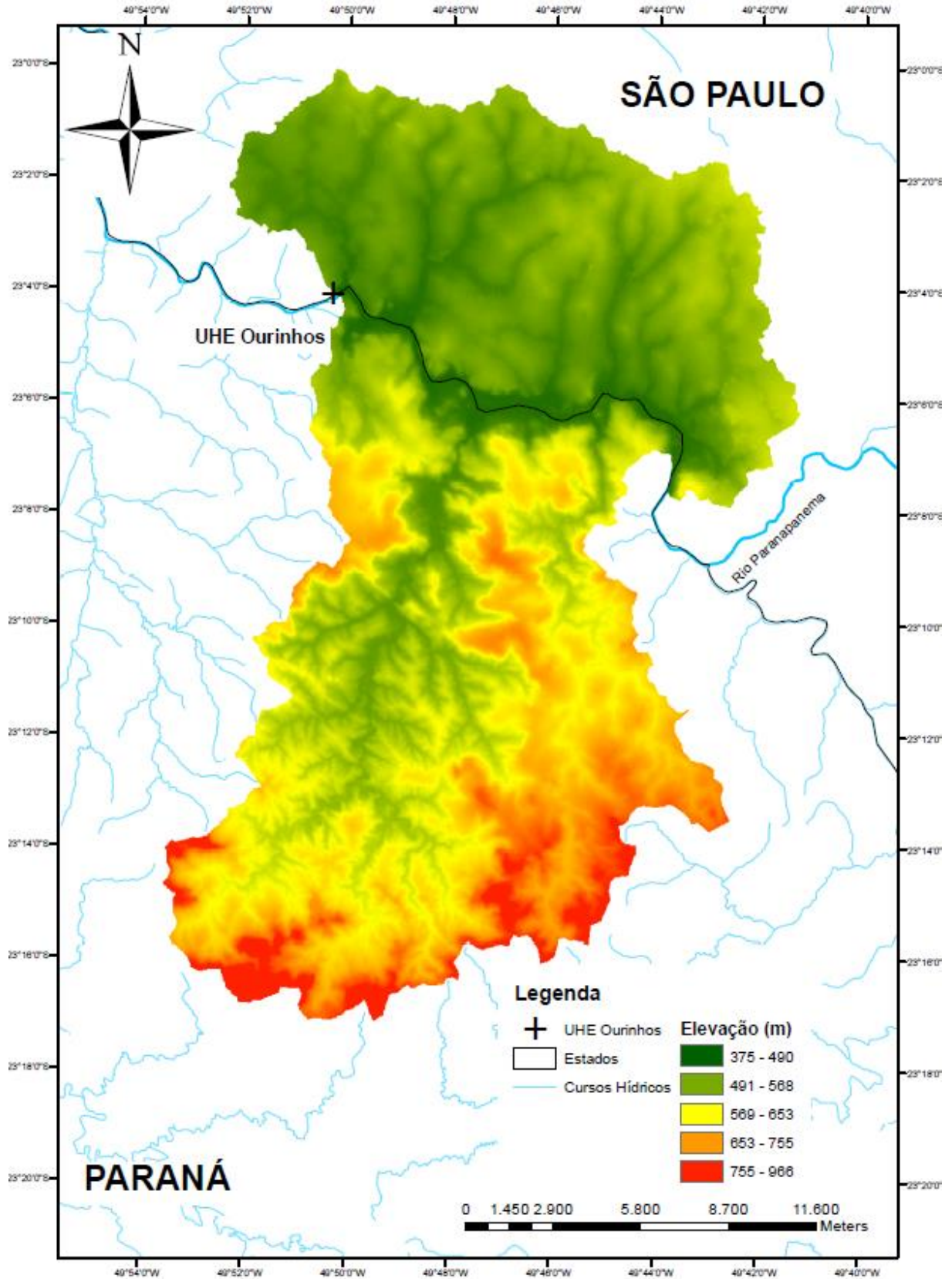
4.2.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Na elaboração do mapa de elevação foi utilizado os dados do projeto *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM, baixadas através do portal *Earth Explorer*, administrado pelo USGS (USGS, 2020).

A bacia hidrográfica e modelo digital de elevação foram elaboradas no ArcGIS® 10.3. As informações espaciais, elaboração e apresentação de todos os produtos cartográficos deste estudo foram realizadas utilizando o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000 em coordenadas geográficas (GCS). O mapa foi elaborado na escala de 1: 150.000, formato: TIFF (32 bits) resolução espacial: 30 metros.

O tamanho das células do Modelo Digital de Elevação – MDE foram dimensionadas em 30 m x 30 m, equivalente a 900m² ou 0,09 ha, realizando as devidas conversões, bem como os demais mapas em formato raster, resultando na padronização da dimensão das células para a execução das operações algébricas entre os diferentes planos de informação que compõem a equação de perda de solo, utilizada neste trabalho (Figura 8).

Figura 8 – Modelo Digital de Elevação da Bacia contribuinte da UHE Ourinhos



Fonte: USGS, 2020.

4.2.2.2 Índice de Erosividade das Chuvas (Fator R)

Na Equação Universal de Perdas de Solo a estimativa do fator erosividade é de fundamental importância para o planejamento conservacionista de uso e manejo do solo.

De acordo com o manual da Natural Capital Project (2015), o valor do índice de erosividade deve ser obtido por meio de publicações científicas ou pode ser calculado com base em metodologia específica.

O programa netErosividade SP é um programa de acesso gratuito, desenvolvido por um grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (GPRH/UFV) junto ao Instituto Agrônômico (IAC), consistindo em uma rede neural artificial (RNA), capaz de estimar os valores de R para qualquer localidade do Estado de São Paulo, a partir de dados de latitude, longitude e altitude (MOREIRA et al, 2006). A Figura 9 apresenta a interface do programa utilizado.

Figura 9 - Software netErosividade SP



Para o Estado do Paraná, Lombardi Neto e Moldernhauer (1992) apud Silva 2004, utilizam a seguinte equação:

$$Rx = 69.73 * \left(\frac{M^2}{P}\right)^{0.841} \quad (9)$$

Onde:

- Elm = Índice de erosividade média mensal (MJ.mm/ha.ano)
- M = Precipitação média mensal (mm)
- P = Precipitação média anual (mm)

A média anual do fator “R” pode ser obtida pelo somatório dos valores da média mensal dos índices de erosividade.

$$FATOR R = \sum_1^{12} Elm \quad (10)$$

O Fator R pode ser mapeado por isolíneas para uma determinada região, sendo de muita utilidade e usual. As linhas representam a mesma erosividade, indicando que cada local tem um valor médio de erosividade fixo, pouco variável. É um traçado semelhante ao que se faz as isoietas, isto é, obtém-se valores de R para os locais onde há pluviógrafos, anotam-se esses valores no mapa da região e interpolam-se os pontos de medidas inteiras, e em seguida, são lidos os pontos do mesmo valor de R. São feitos mapas para valores médios anuais (Carvalho, 2008).

Conforme Eletrobrás (1998), as Classes de erosividade (Fator R) variam de fraco a muito forte, conforme apresentado na Tabela 8:

Tabela 8 – Classes de erosividade (Fator R)

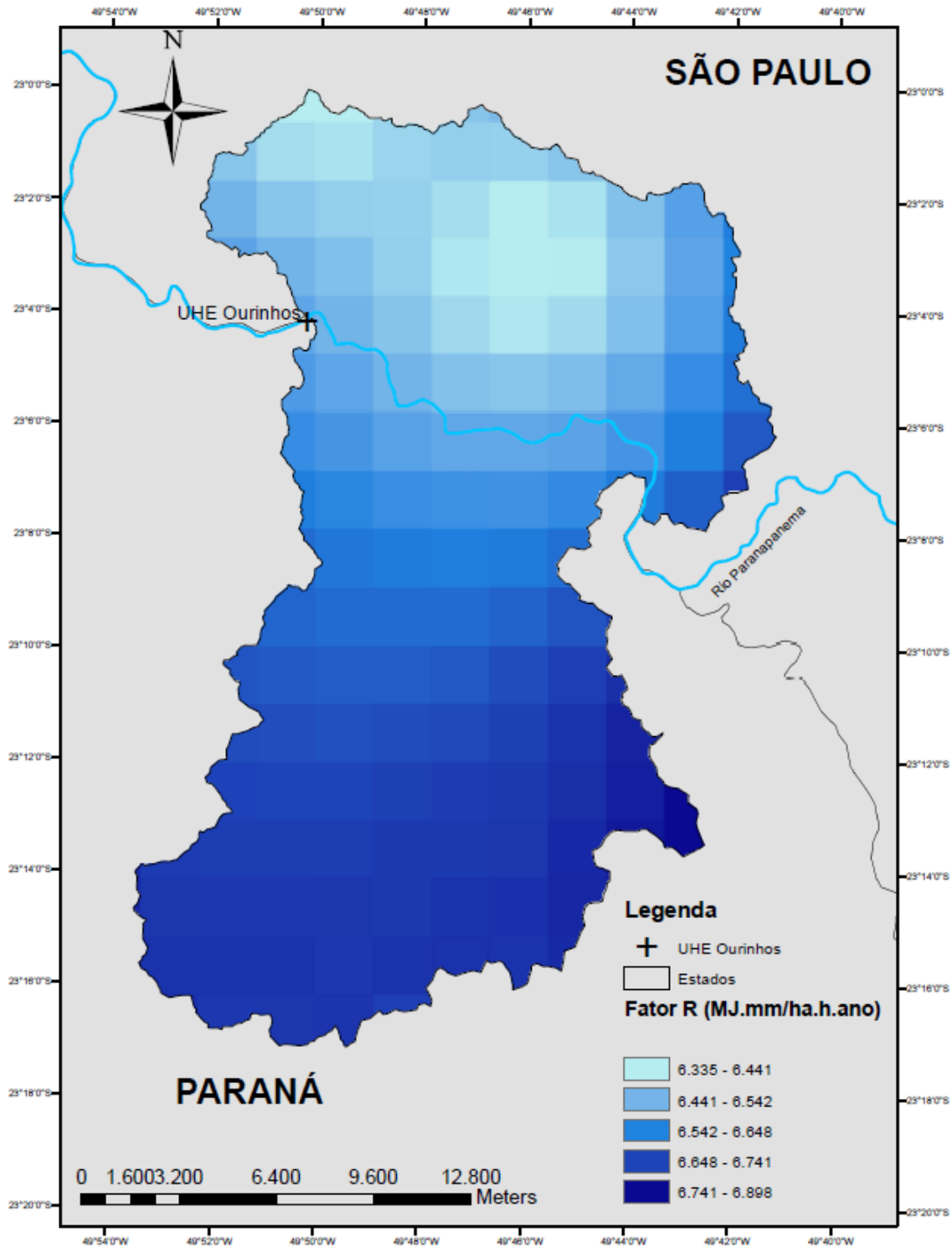
Classes de Erosividade (MJ.mm/ha.h.ano)	Intensidade
R < 2.500	Fraca
2.500 < R < 5.000	Moderada
5.000 < R < 7.500	Moderada a Forte
7.500 < R < 10.000	Forte
R > 10.000	Muito Forte

Fonte: Eletrobrás, citado por Carvalho, 2008. (Adaptado).

Visto que a bacia de contribuição da UHE Ourinhos está inserida na região que apresenta o fator de erosividade com valores variando entre 6.335 a 6.898 MJ.mm/ha.h.ano, optou-se por adotar o valor médio como representativo da erosividade, assim adotou-se o valor de 6.615 MJ.mm/ha.h.ano, sendo assim, uma intensidade moderada a forte de erosividade da chuva.

Com base nos valores obtidos no mapa de erosividade (R) constatou-se que a bacia contribuinte da UHE Ourinhos possui Classe de erosividade com intensidade de média à forte, conforme observado na Figura 10.

Figura 10 – Mapa de Erosividade da chuva



Fonte: Gouveia, (2018).

4.2.2.3 Índice de Erodibilidade (Fator K)

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2014), determinados solos são mais vulneráveis aos processos erosivos do que outros, sob a mesma intensidade de chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas conservacionistas. Essa vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo aos processos erosivos é denominada erodibilidade do solo.

Os valores de erodibilidade (Fator K) de cada tipo de solo identificado na bacia estão expressos na Tabela 9, foram obtidos por meio de valores encontrados na literatura.

Tabela 9 – Fator de Erodibilidade K correlacionados com o tipo de solo

Tipo de Solo	Fator K (t. ha / MJ. mm)	Referências
Argilossolos	0,0425	Carvalho et al. (1989)
Latossolos	0,0162	Moretti (2001)
Neossolos	0,0351	Moretti (2001)
Nitossolos	0,011	González (2007)

Conforme Eletrobrás (1988) apud Carvalho 2008, as Classes de erodibilidade (Fator K) variam de fraco a muito forte, conforme apresentado na Tabela 10.

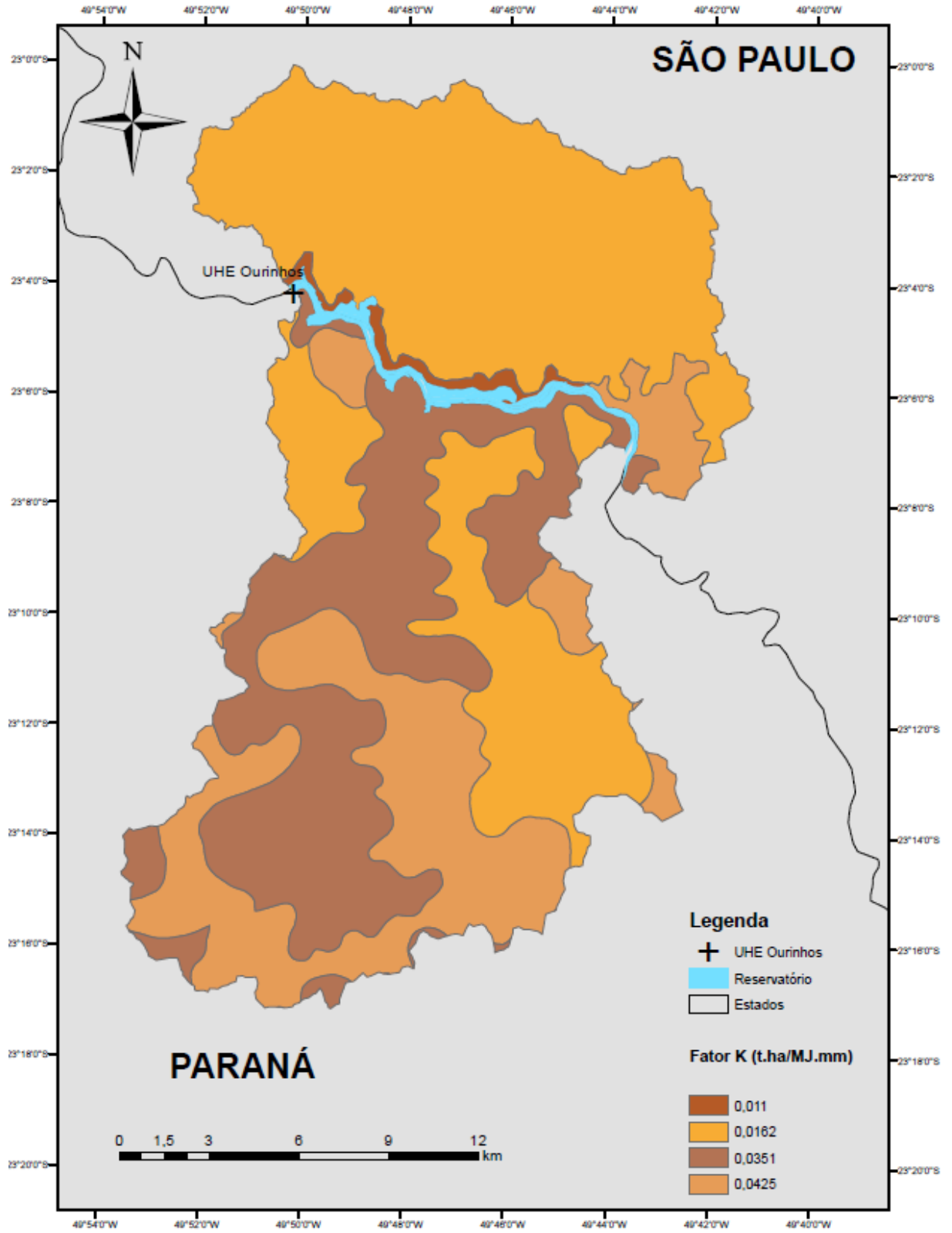
Tabela 10 – Classes de Erodibilidade

Classes de Erodibilidade (t.ha/MJ.mm)	Classe de Erosividade	Dados Observados (%)
K < 0,015	Fraca	0%
0,015 < K < 0,030	Média	72%
K > 0,30	Elevada	28%

Fonte: Eletrobrás, citado por Carvalho, 2008. Adaptado.

A bacia apresentou valores de erodibilidade média em 72% da área total e somente 28% da área apresentaram valores de erosividade elevada. O mapa de erodibilidade apresenta os dados inseridos no programa InVEST para o cálculo da equação universal de perda de solo (Figura 11).

Figura 11 – Mapa de Erodibilidade – Fator K



Fonte: Próprio Autor, 2021.

4.2.2.1 Uso e Cobertura o Solo

A identificação do uso, ocupação e cobertura da terra na bacia hidrográfica da UHE Ourinhos foi extraída do MapBiomas versão 5.0, disponibilizadas gratuitamente. A classificação foi obtida pela série de satélites Landsat, com resolução espacial de 30 metros.

Na Tabela 11 estão registrados percentuais e área do uso e ocupação do solo da bacia contribuinte da UHE Ourinhos, que apresenta área de 395,7 Km², observando-se um uso e ocupação diversificados. A área de pastagem ocupa a maior porção, com um total de 178,11 km² (45,01%). A segunda maior porção é ocupada por cultura permanente 70,66 km² (17,85%), seguida de área campestre, com 63,01 km² (15,92%) e florestas com área correspondente a 53,43 km² (13,50%) e cultura temporária, com 20,39 km² (5,15%). Com menor representatividade na bacia, tem-se a área urbana com 5,26 km² (1,33%).

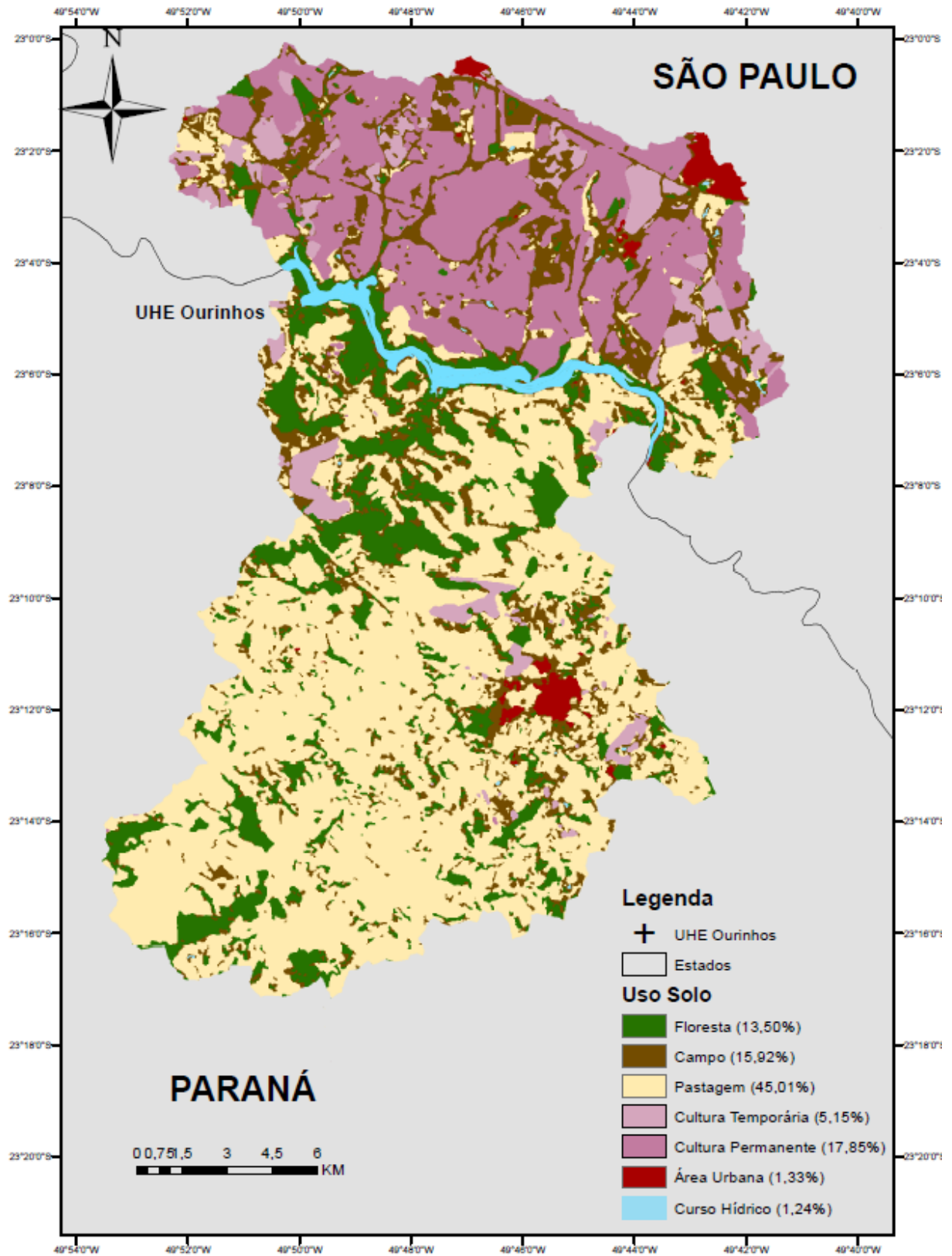
Tabela 11 -Classes de uso do solo da bacia contribuinte da UHE Ourinhos

Classe de usos do solo (2017)	Área (km³)	Uso e Cobertura (%)
Floresta	53,43	13,50%
Campo	63,01	15,92%
Pastagem	178,11	45,01%
Cultura Temporária	20,39	5,15%
Cultura Permanente	70,66	17,85%
Área Urbana	5,26	1,33%
Curso Hídrico	4,89	1,24%
Total	395,74	100,00%

Fonte: Próprio Autor, 2021.

As principais classes de solo da bacia contribuinte da UHE Ourinhos com as respectivas áreas ocupadas estão apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Mapa de Uso e Ocupação do Solo



Fonte: MapBiomias (2017).

4.2.2.2 Tabela Biofísica

A Tabela Biofísica corresponde aos atributos relativos às classes de uso do solo da bacia hidrográfica. Desta forma, cada linha corresponde a um tipo de uso do solo e cada coluna deve ser renomeada e ter valores definidos, conforme estabelecido no manual da Natural Capital Project (2015):

- Eups_c: Fator C relacionado ao manejo dos usos do solo para a equação universal de perda de solo, sendo o valor estabelecido entre 0 e 1.
- Eups_p: Fator P relacionado as práticas conservacionistas do uso do solo para a equação universal de perda de solo, sendo o valor estabelecido entre 0 e 1.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2014), o fator C retrata, além da combinação de sequências de culturas e práticas de manejo, a proteção exercida pela cobertura vegetal em uma dada área, reduzindo assim, o valor final obtido pela equação universal de perda de solo.

O fator P é relativo a práticas conservacionistas no manejo do solo, sendo responsável por diminuir a erosão de sedimentos quando aplicado. Por isso, adotou-se os parâmetros considerados na Tabela 12 para a área da bacia hidrográfica da UHE Ourinhos.

Tabela 12 – Fator de uso e manejo do solo (C) e o fator de práticas conservacionistas (P)

Classe de usos do solo	Fator C	Fator P	Referências
Floresta	0,001	0	Bertoni e Lombardi Neto, 1983
Campo	0,01	0,5	Bertoni e Lombardi Neto, 1983
Pastagem	0,01	0,5	Bertoni e Lombardi Neto, 1983
Cultura Temporária	0,1	0,5	Sivertun, 2003
Cultura Permanente	0,02	0,5	Bertoni e Lombardi Neto, 1983
Área Urbana	0,03	0	Sivertun, 2003

Fonte: Gouveia, 2017.

4.2.2.3 Parâmetros de Calibração

Para a calibração do modelo de aporte de sedimentos na bacia hidrográfica contribuinte da UHE Ourinhos no software InVEST, foram aplicadas variáveis como limite de acumulação de fluxo (*Threshold flow accumulation*), relação máxima do aporte de sedimento ($SDR_{máx}$) e os fatores de calibração k_b e IC_0 .

Os fatores k_b e IC_0 são de calibração e definem a relação entre o índice de conectividade e a razão de remoção de sedimentos (SDR). Vigiak et al. (2012) e Jamshidi et al. (2013) adotaram os valores de IC_0 de 0,5 e k_b de 2, para estudos desenvolvidos na Espanha e Austrália, respectivamente. Vigiak et al. (2012) afirmaram que estes valores foram os ideais para a calibração, com coeficiente de eficiência do modelo (ME) da ordem de 97%, conforme citado por Zanella, (2016).

Considerando que cada célula da bacia contribuinte da UHE Ourinhos apresenta dimensões de 30 metros conforme a resolução de cada célula dos mapas do banco de dados, aplicou-se o valor de 5000 para o *Threshold flow accumulation* na geração do modelo do InVEST.

A relação do aporte de sedimento máxima ($SDR_{máx}$) corresponde ao valor máximo que uma célula pode atingir em função da textura do solo (Natural Capital Project, 2015).

A Tabela 13 apresenta os Parâmetros de calibração utilizados para a geração do modelo InVEST.

Tabela 13 – Parâmetros de Calibração utilizados.

Parâmetros de Calibração	Fatores	Referências
Threshold flow accumulation	1000	Moroz, 2018.
k_b	2	Vigiak et al. (2012) e Jamshidi et al. (2013)
IC_0	0,5	Vigiak et al. (2012) e Jamshidi et al. (2013)
$SDR_{máx}$	0,7 a 0,9	Vigiak et al. (2012)

Fonte: Zanella, 2016.

4.3 VIDA ÚTIL DO RESERVATÓRIO

4.3.1 *Cota-Área-Volume*

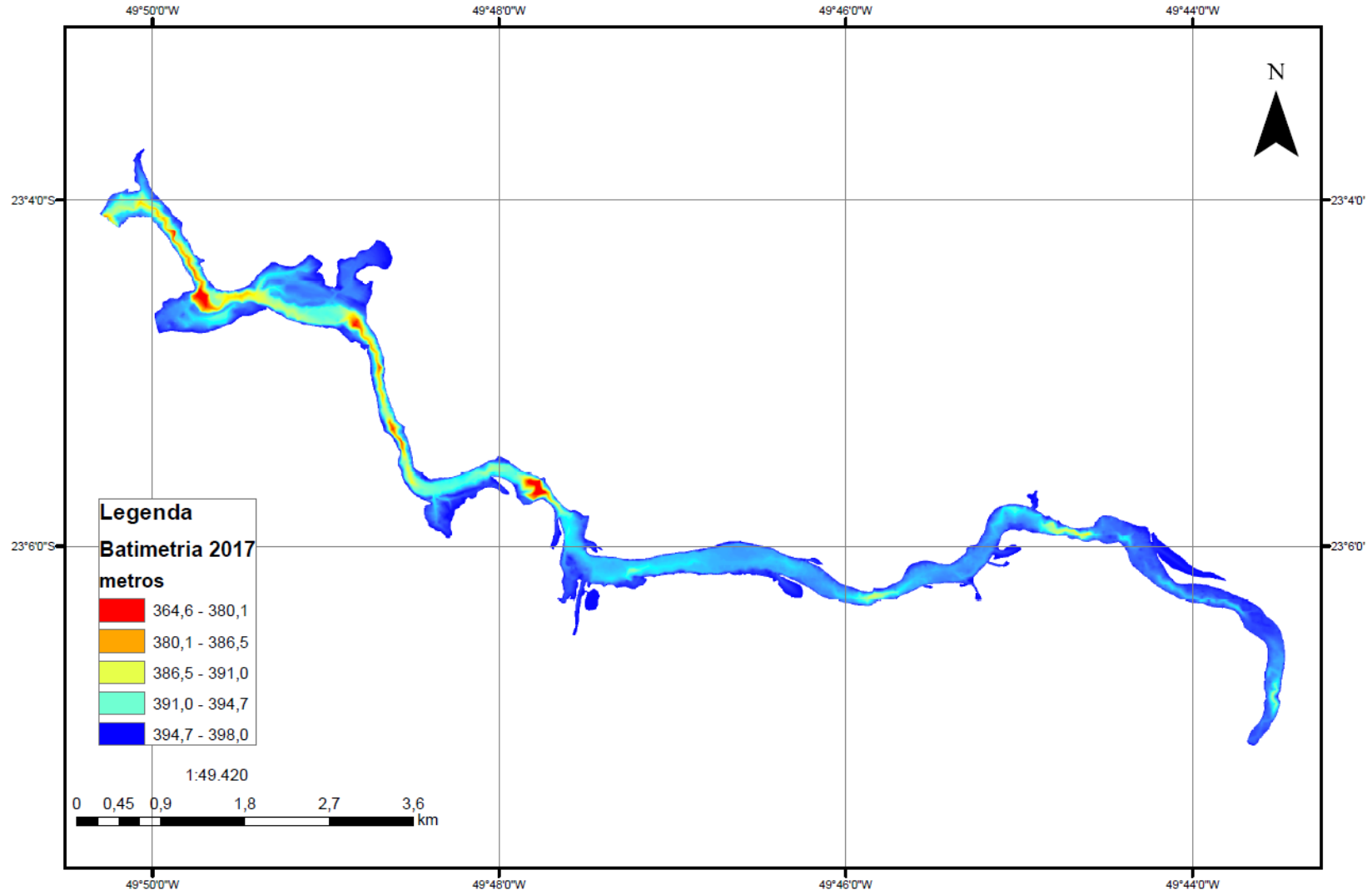
Os levantamentos das Seções Batimétricas foram realizados para conhecimento e detalhamento das áreas submersas do reservatório. Os produtos resultantes dos Levantamentos Batimétricos em conjunto com a cartográfica existente resultaram como base para geração das curvas Cota x Área e Cota x Volume.

Concomitantemente à execução das seções batimétricas, foram levantados dados topográficos da área seca, nas margens, registrando a posição de pontos em três direções (XYZ). O espaçamento utilizado para os pontos coletados na batimetria foi no máximo de 2,0 m, o mesmo utilizado para o levantamento batimétrico do Reservatório.

Para a UHE Ourinhos foi gerado um modelo 3D único, contendo a malha de pontos contínua (curvas de nível + pontos batimétricos) onde foram interpoladas e geradas as curvas de nível com equidistância de 0,5 m, para toda a área de influência.

O Reservatório da UHE Ourinhos possui elevação entre 398,1 m e 364,6 m. A Figura 13 apresenta o Modelo digital do terreno do reservatório da UHE Ourinhos.

Figura 13 – Modelo Digital do Reservatório da UHE Ourinhos



Fonte: Próprio Autor, 2021. MDT disponibilizado pela ANA

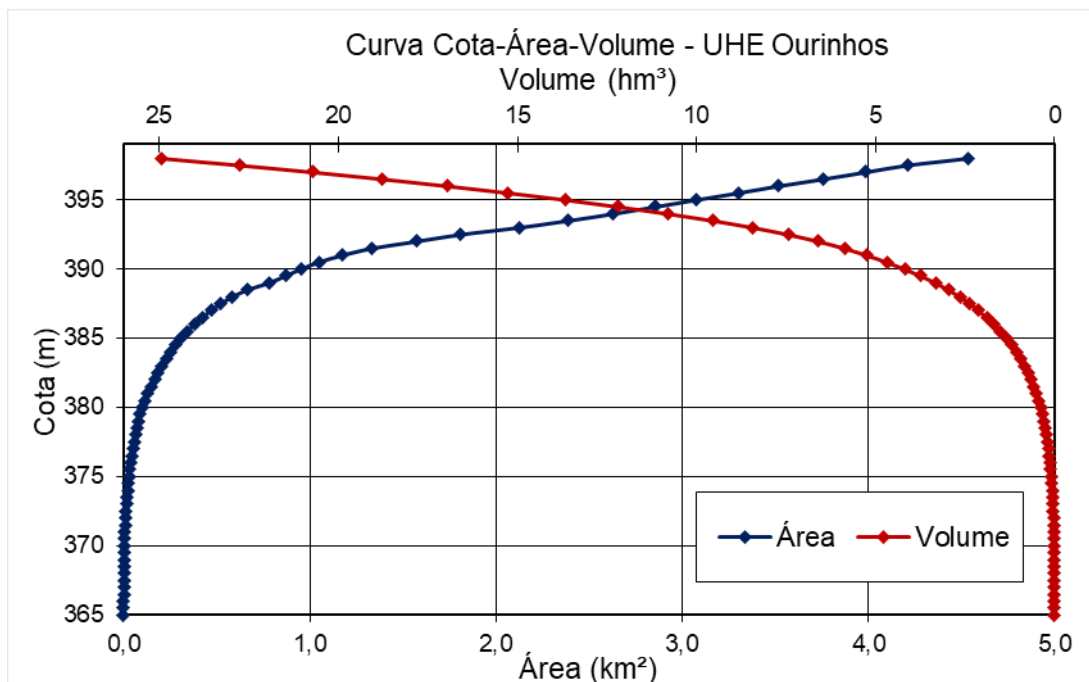
Através da batimetria disponibilizada, foram elaboradas as curvas Cota x Área e Cota x Volume, utilizando-se do software ArcGIS versão 10.3, realizando o fatiamento a cada 50 cm.

A ferramenta calcula a área e o volume de uma superfície raster (nesse caso o Modelo Digital de Elevação) em função de um determinado plano de referência especificado (as cotas objetivadas). Os cálculos de área e volume relatados pela ferramenta são baseados sobre a extensão dos pontos espaçados regularmente do MDE.

A partir na tabela realizada, efetuou-se um Gráfico de linhas para o traçado a curva Cota-Área-Volume, conforme apresentado na Figura 14.

Desse modo, o reservatório da UHE Ourinhos apresenta volume total de 25,43 hm³ e área de 4,44 km².

Figura 14 – Curva Cota x Área x Volume do Reservatório da UHE Ourinhos



Fonte: Próprio Autor, 2021. MDT disponibilizado pela ANA.

4.3.2 Descarga Sólida Total

Para cálculo da descarga sólida total afluente do reservatório, considerou-se a Estação Fluviométrica da UHE Chavantes, localizada próximo ao início do reservatório da UHE Ourinhos. A Tabela 14 apresenta a relação da série de dados da Estação.

Tabela 14 – Dados da Estação utilizada

Local	Código	Nome Estação	Série de Dados	Nº de Registros
1	64270050	USINA CHAVANTES - JUSANTE	05/04/2000 a 02/04/2010	27

Fonte: ANA.

Contudo, o cálculo da descarga sólida total foi realizado utilizando o programa elaborado por Prodanoff (1996), o qual permite, após entrada das variáveis que integram a equação de Colby (1957), o cálculo automático da descarga sólida total (t/dia), descarga sólida medida (t/dia) e descarga sólida não medida (t/dia), sendo esta última representativa da carga de leito (Figura 15).

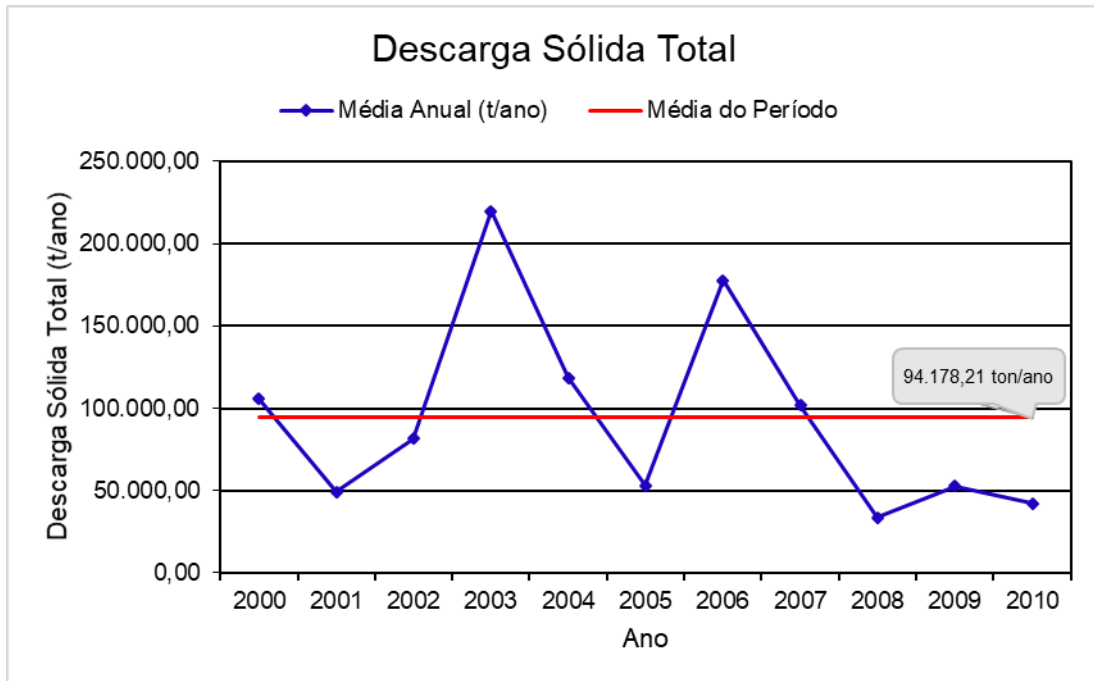
A partir dos dados de descarga líquida obtidos, foram utilizados para cálculo da descarga sólida total por meio do Software Método de Coby (1957).

Figura 15 - Programa utilizado para o cálculo da descarga sólida total, pelo método de Colby, elaborado por Prodanoff (1996, 2008).

Fonte: Bernal, 2016.

Utilizando as equações correspondentes e os dados da série de vazões diárias, foram obtidos os valores médios anuais e descargas sólidas anuais para os respectivos anos de 2004 a 2010, totalizando 265,66 ton/dia ou 94.178,21 ton/ano, conforme representado pela Figura 16.

Figura 16 - Descarga anual de sedimentos para o período de 2000 a 2010



Fonte: Próprio Autor, 2021.

4.3.3 *Peso específico aparente estimado*

Nos pequenos reservatórios geralmente o material que predominantemente fica depositado é a areia. Por este motivo, o peso específico aparente inicial é arbitrado entre 1,4 a 1,5 t/m³; nos reservatórios de porte médio pode-se ter uma composição com peso específico aparente inicial variando de 1,2 a 1,4 t/m³, enquanto para grandes reservatórios, onde somente pequena quantidade de finos passa pelos condutos e vertedouro, esse valor pode variar de 1,1 a 1,3 t/m³. (CARVALHO et al., 2000).

Outra avaliação proposta por ZHIDE (1998 apud CARVALHO, 2008) para a obtenção do peso específico aparente inicial é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Peso específico médio aparente de longo prazo de depósitos em reservatórios em t/m³

Sedimento	Granulometria (mm)	Peso específico aparente (t/m ³)
Argila	< 0,005	0,8 a 1,2
Silte	0,005 a 0,05	1,0 a 1,3
Areia média e fina	0,01 a 0,5	1,3 a 1,5
Areia grossa e pedregulho fino	0,5 a 10,0	1,4 a 1,8
Pedregulho médio	>10,0	1,7 a 2,1

Fonte: ZHIDE (1998 *apud* CARVALHO, 2008)

Pela ausência de informações referentes à granulometria e peso específico aparente, adotou-se então um valor aproximado para γ_{ap} de 1,40 t/m³ para pequenos reservatórios.

4.3.4 Eficiência de retenção do sedimento

O método utilizado o cálculo de E_r é o de Churchill (1948), considerado para reservatórios pequenos, utiliza o valor do índice de sedimentação (IS) para a construção da curva. Esse índice é um valor que relaciona dados hídricos e geométricos do reservatório e serve para ter uma noção temporal da sedimentação por metro. A unidade é s²/m e o cálculo é descrito na Equação 11.

$$IS = \frac{Vol^2}{Q^2 L} \quad (11)$$

Onde:

Vol: volume total do reservatório (m³);

Q: vazão média afluyente (m³/s);

L: comprimento do reservatório (m).

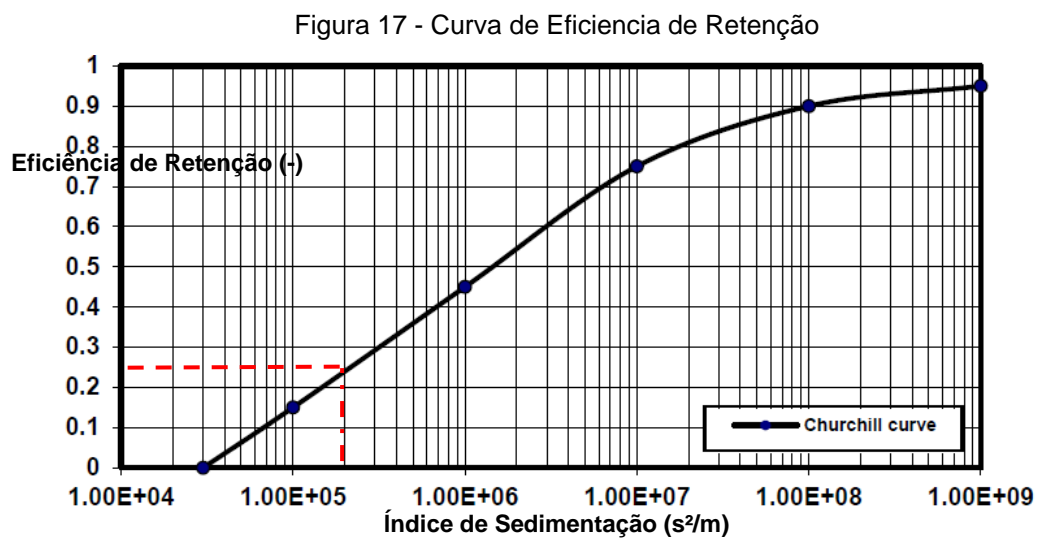
Considerando os parâmetros utilizados no cálculo do IS, a planilha apresenta os valores e referências utilizadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados utilizados para obtenção da eficiência de retenção

Parâmetros de entrada	
Volume total (m ³)	25.430.000
Comprimento (m)	15.000
Vazão afluyente média anual (Q _{afl.})	1,16E+10
Parâmetros Resultantes	
Índice de Sedimentação (IS)	2,13E+05

Para cálculo da vazão média afluyente, considerou-se a vazão Média do ano de 2017, considerando 450,19 m³/s.

A partir de valores obtidos na Tabela 16, é possível obter a Eficiência de retenção por meio da Curva de Er (Figura 17), considerando Er = 25%.

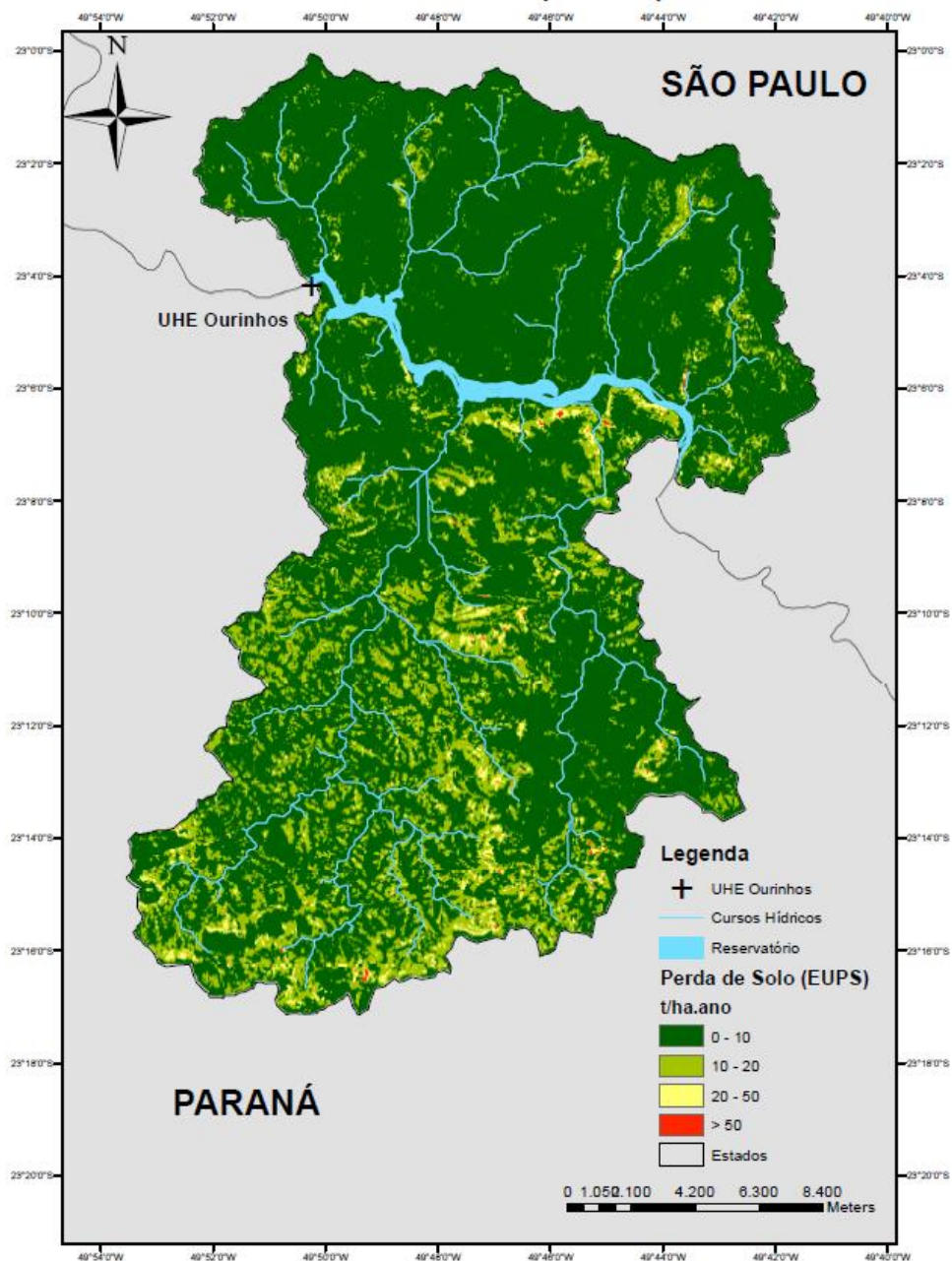


5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE DO APORTE DE SEDIMENTOS

A perda de solos, fator responsável pela produção de sedimentos, foi calculada a partir da multiplicação dos fatores integrantes da EUPS. O resultado da modelagem é apresentado para a área total Figura 18. A produção total de sedimentos para a Bacia Hidrográfica da UHE Ourinhos foi de 407.126,43 t/ano.

Figura 18 – de Estimativa de perda de solo na bacia contribuinte da UHE Ourinhos



Fonte: Próprio Autor, 2021.

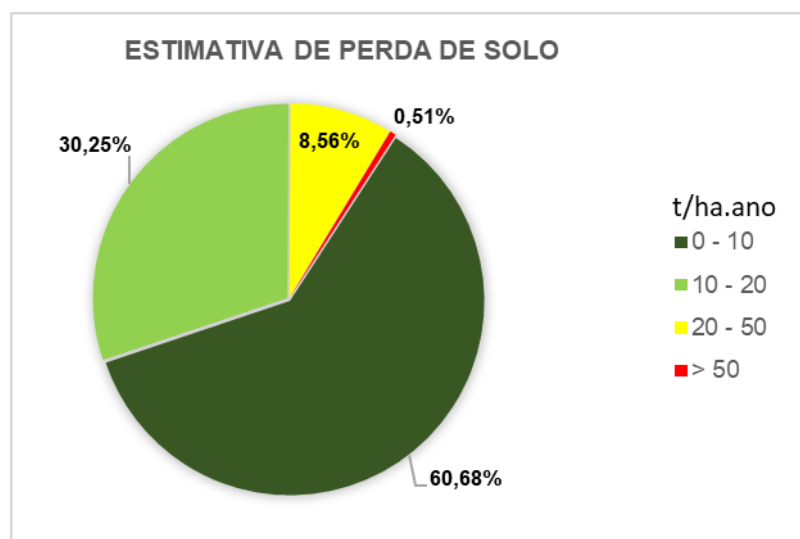
Os maiores resultados encontrados na produção de sedimentos apresentam características semelhantes ao mapa de uso e ocupação do solo. Quando comparado os mapas, identifica-se que as áreas de menores valores, de até 1 ton/ha.ano, que ocorrem, em sua maioria, concomitantemente com os locais de floresta, quando em locais de pastagens e áreas agricultáveis destaca-se que as maiores produções por área chegando a atingir 50 ton/ha.ano.

Os tipos de solos presentes na bacia são Latossolos, Neossolos e Argissolos. A bacia apresentou valores de erodibilidade média em 72% da área total e somente 28% da área apresentaram valores de erosividade elevada.

Como a distribuição da perda de solo expressa na Figura 18 assemelha-se às feições expostas no mapa de uso e cobertura do solo, entende-se que os resultados para o potencial de erosão sofrem dominância do fator de cobertura e uso do solo (parâmetro C da EUPS). O fator de erodibilidade do solo (parâmetro K da EUPS) torna-se secundário na expressão da erosão, sendo relevante quando na avaliação de locais com mesma cobertura, porém diferentes solos.

Segundo a classificação proposta pela Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO e apresentada por Riquier (1984), a erosão hídrica para a área total analisada variou de nula a pequena em 28,8% da área, de moderada em 64,8% e forte em 0,5% da área, conforme Figura 19.

Figura 19 – Estimativa de Perda de Solo



Fonte: Próprio Autor, 2021.

5.1.1 Taxa de Transferência de Sedimentos

A taxa de transferência de sedimentos (SDR) corresponde a porcentagem do sedimento produzido na bacia hidrográfica, que efetivamente chega no seu exutório. No cálculo do SDR foi utilizada a descarga média anual de sedimentos, calculada para a estação fluviométrica.

Os valores da SDR em porcentagem são multiplicados pelos valores de perda do solo para toda a área.

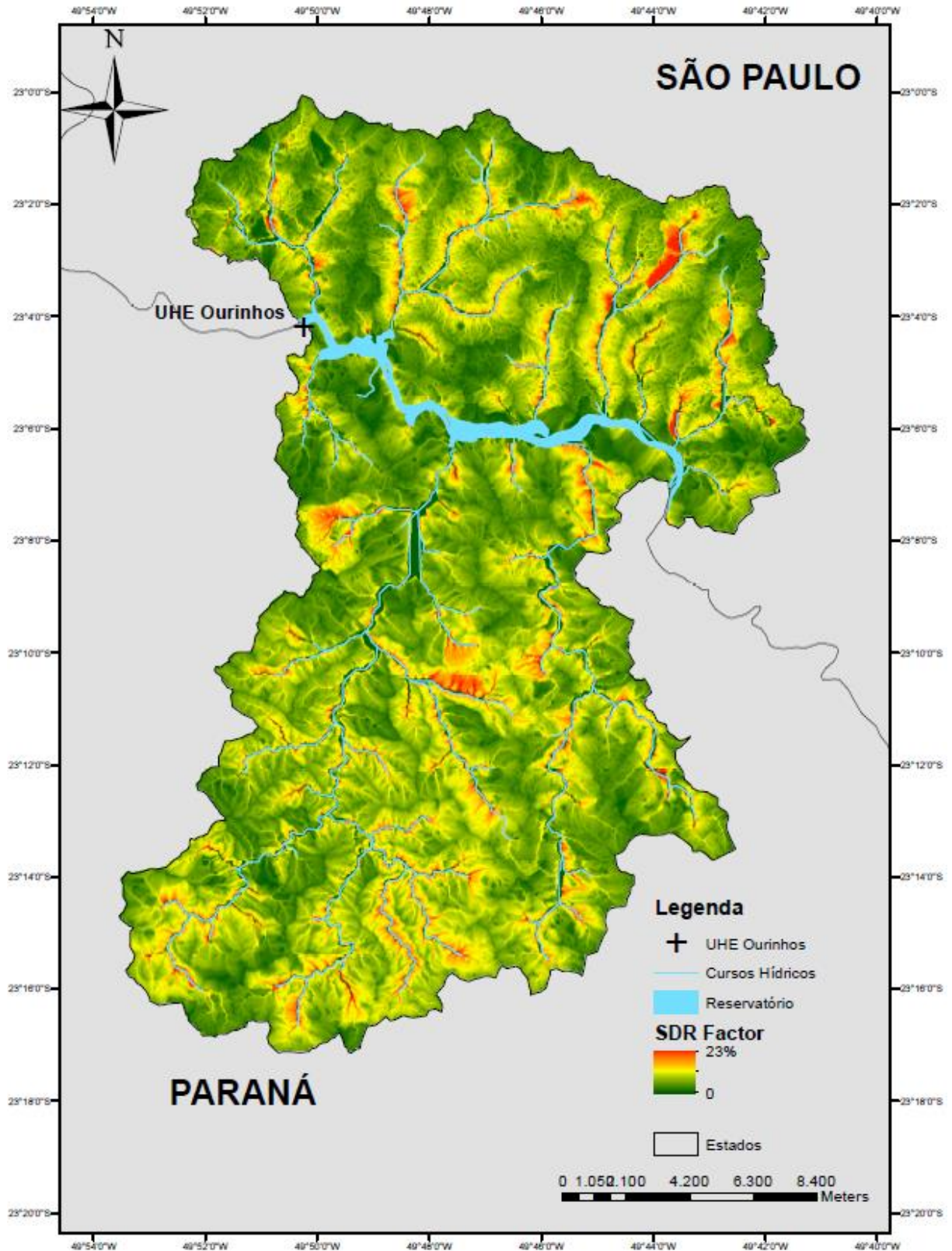
$$SDR = 100 \frac{94.178,21}{407.126,43} \quad (12)$$

$$SDR = 23\% \quad (13)$$

Conforme equação expressa acima, apenas 23% da erosão total da bacia chega de fato até o exutório. O valor de SDR obtido para a bacia em análise está coerente com valores apresentados pela literatura. Segundo Walling (1983) somente cerca de 0,1% a 37,8% da erosão bruta alcança o exutório.

A Figura 20 apresenta a Taxa de exportação de sedimentos, conforme parâmetros resultantes do Software InVEST. Nota-se que as maiores taxas de sedimentos se dão próximo aos cursos hídricos.

Figura 20 – Sedimentos exportados na Bacia Contribuente da UHE Ourinhos



Fonte: Próprio Autor, 2021.

5.2 VIDA ÚTIL

A partir dos dados disponibilizados, calculou-se a vida útil do reservatório a partir da expressão do assoreamento, obtendo os parâmetros resultantes conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Cálculo da Vida Útil.

Parâmetros de Entrada	
Nível d'água máximo normal (m)	398,00
Nível d'água na Soleira da Tomada d'Água	395,00
Volume útil (hm ³) - 2017	20,82
Volume na soleira tom. d'água (hm ³)	13,65
Volume no NA máx. Normal (hm ³)	25,43
Taxa de Transferência de Sedimentos (%)	25%
Descarga sólida total média anual (Método de Coby) (t/dia)	265,66
Perda de Solo na Bacia (EUPS) (t/ano)	407.126,43
Parâmetros Resultantes	
Deflúvio sólido total médio anual - Dst (t/ano)	101.781,61
Obtenção da eficiência de retenção - E _r (%)	25%
Peso específico médio aparente - γ_{ap} (t/m ³)	1,4
Volume de sedimento médio anual - S (m ³ /ano)	181.75,29
Tempo de assoreamento do volume total no NA máx Normal - T (anos)	1146
Tempo de assoreamento do volume até a Tomada d'Água – T (anos)	751

Fonte: Próprio Autor, 2021.

Inicialmente considerou-se a batimetria realizada em 2017 para obtenção da Área e do Volume do reservatório.

Para determinação de E_r utilizou-se a metodologia de Churchill, na obtenção das características geométricas do reservatório e Índice de Sedimentação do Reservatório, em função da sua curva de Retenção. Constatou-se que a Eficiência de retenção do reservatório é de 25%.

Por ausência de dados de sedimentos no ano de 2017, foi realizado uma média para o período de 2000 a 2010, com 27 registros de medição. Por meio do Método de Coby (1957) foi possível obter a Descarga Sólida total, considerando o valor médio de 94.178,21 t/ano na bacia.

Calculou-se então o Volume de sedimentos médio anual para o ano de 2017, totalizando 181.75,29 m³/ano.

Em função da razão entre Volume do reservatório e o Volume de sedimentos médio retido, foi obtido o Tempo de assoreamento em anos considerando o Nível d'Água Normal (398,00 m) e o Nível da Tomada d'Água (365,00 m).

Conforme Carvalho, (2000), a vida útil do aproveitamento sob o ponto de vista sedimentológico, é considerado quando os sedimentos alcançam a soleira da tomada d'água e passam a perturbar ou impedir a operação. Por isso, considera-se que a vida útil da UHE Ourinhos é de 751 anos, considerando parâmetros médios e uso do Solo do ano de 2017.

Levando em consideração a área da Bacia de Contribuição da UHE Ourinhos não possui entrada de sedimentos de montante, visto que a UHE Chavantes se encontra a montante, pode-se considerar que a bacia possui baixas taxas de perda de solo, com taxa de transferência adequada, considerando o tamanho da bacia e uso do solo na região.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada permitiu calcular a produção total de sedimentos por meio da Equação Universal de Perda de Solo, o modelo possibilitou a espacialização de classes de perdas de solos com indicações de áreas consideradas mais ou menos suscetíveis aos processos erosivos laminares, principalmente quando combinados ao Uso e Cobertura do Solo.

Dentre as contribuições deste trabalho destaca-se a modelagem de perda de solos e a estimar a taxa de transferência da Bacia Hidrográfica, onde 23% da produção de sedimentos chega efetivamente no exutório.

Também foi realizado o cálculo de descarga sólida total a partir do método de Coby por meio da Ferramenta computacional de Prodanoff, otimizando o cálculo da descarga sólida total.

Diante das limitações enfrentadas, foi possível estimar a Vida útil do reservatório, utilizando valores referenciados na literatura brasileira e internacional.

Além disso, destaca-se a importância da contribuição do trabalho na Gestão e Regulação de Recursos hídricos e na operação e monitoramento de reservatórios hidrelétricos.

A maioria dos grandes reservatórios nacionais apresenta menos de 50 anos de existência. Por esta razão, não apresentaram ainda problemas significativos relacionados ao assoreamento. No entanto, como o passar dos anos, estes reservatórios tendem a demonstrar as influências destes depósitos em suas operações, além de exigirem uma maior atenção quanto ao monitoramento dos seus parâmetros hidrossedimentológicos.

Em suma, um adequado monitoramento do reservatório proporciona uma melhor operação dos reservatórios e conseqüentemente, na geração de energia elétrica. Cabe ao órgão regulador propor medidas para minimizar os impactos socioeconômicos causados por barragens.

Portanto, recomenda-se acrescentar na Resolução Normativa Nº 03 ANA/ANEEL para aumentar a periodicidade dos estudos sedimentométricos em

reservatórios levando em consideração a produção total de sedimentos na bacia na qual o reservatório encontra-se instalado, desde a fase de viabilidade até a operação do empreendimento.

Importantes complementações a esse estudo podem ser realizadas a fim de refinar e acrescentar dados e interpretações que levem a um melhor entendimento acerca das questões apresentadas. Desse modo, sugere-se realizar novos levantamentos batimétricos e hidrossedimentológicos no Reservatório da UHE Ourinhos e acompanhar a evolução destes parâmetros e análise das consequências na operação do reservatório.

REFERÊNCIAS

AGASSI, M. **Soil erosion, conservation and rehabilitation**. New York: M Dekker, 1996. 402 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológico. Brasília: ANA, SGH, 2013. 40 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Resolução Conjunta Nº 03**. De 10 de agosto de 2010. Brasília, DF, 2010.

ÁLVARES, M. T. P; PIMENTA, M. T. **Erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas**. [S. l.: s. n.], 1998.

ALVES, V. F, *et al.* Resolução Conjunta ANA/ANEEL nº 03/2010: implementação e reflexos no monitoramento hidrológico do país. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 12., [s. l.]. **Anais [...]** [S. l.: s. n.], 2014.

AZEVEDO, L. M. N. **Calibração, validação e aplicação do modelo InVEST para a estimativa de benefícios aos serviços ecossistêmicos na bacia do Ribeirão Pipiripau (DF/GO)**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

BRAGA, C. C *et al.* Análise da quantidade de descarga sólida total dos principais afluentes da bacia hidrográfica do reservatório da UHE barra dos coqueiros. **Edição Especial**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 495-505, 2012."

BERNAL J. M. S. **Contribuição do aporte fluvial de sedimentos para a construção da planície deltaica do Rio Jequitinhonha – BA**. 2009. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Geologia) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2009.

BERNAL J. M. S. **Contribuição do aporte fluvial de sedimentos para a construção das principais planícies quaternárias do estado da Bahia**. 2016. 104 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. [S. l.]: Editora Interciência, 2008. 559 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000a. 95 p.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JÚNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília, DF: ANEEL, 2000b. 107 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica de bacias hidrográficas**. Notícias Geomorfológicas, Campinas, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 200 p.

COLLISCHONN, W. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: [s. n.], 2015. 336 p.

COSTA, L. F. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros Utilizados na Determinação de Taxas de Assoreamento de Reservatórios**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.

CUNHA, A. C. Revisão descritiva sobre ecossistemas aquáticos na perspectiva da modelagem da qualidade da água. **Biota Amazônia**, [s. l.], v. 3, p. 124-143, 2013

EARTH EXPLORER - USGS. **Obtenção da Imagem de Satélite**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 01 jan. 2019

EMBRAPA. **Classes do Solo**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs/solos-do-brasi>. Acesso em: 01 jan. 2020.

FARIA, M. M.; ZACCHI, R. C.; FERREIRA, E. S. Caracterização morfométrica e biológica da Bacia Hidrográfica do Córrego Serafim, Sub-Bacia do Rio Paraibuna, Juiz de Fora MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13, 2009, Viçosa, MG. **Anais [...]** Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2009.

FREITAS, C. K. **Avaliação da retenção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Cunha por meio do Modelo Invest SDR**. 2018. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

HAMEL, P. *et al.* A New Approach to Modeling the Sediment Retention Service (InVEST 3.0): Case Study of the Cape Fear Catchment, North Carolina, USA. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 524–525, p. 166-177, 2015.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS - HIDROWEB. **Dados Hidrológicos. Agência Nacional das Águas – ANA**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 01 jan. 2020.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic, 1998. 771 p.

ICOLD, International Commission on Large Dams. **Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues**. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris, 1989.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da Chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em campinas (SP). *Bragantia*, Campinas, v. 51, p. 189-196, 1992.

MAIA, A. G. **As consequências do assoreamento na operação de reservatórios formados por barragens**. 2015. 271 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MAPBIOMAS. **Obtenção do Uso do Solo**. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em 2020.

MIRANDA, R. B. **Ferramenta computacional para estimativa de parâmetros hidrossedimentológicos em reservatório: Estudo de Caso da PCH Mogi-Guaçu (SP)**. 2015. 226 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MIRANDA, R. B. *et al.* Ferramenta computacional para a estimativa da descarga sólida total por meio do método simplificado de Colby. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS*, 12., 2014, João Pessoa, PB. **Anais [...]** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2014.

MOREIRA, M. C. *et al.* **Programa computacional para estimativa da erosividade da chuva no estado de São Paulo utilizando redes neurais artificiais**. *Rev. Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v. 14, n. 2, p. 88-92, 2006.

MORETTI, L. R. **Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais**. 2001. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and Conservation**. 3. ed. Cranfield University: National Soil Resources Institute, 2005.

MOREIRA, M. C. *et al.* **NETErosividadeSP**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. Acesso em: 01 jan. 2020.

MOROZ-CACCIA GOUVEIA, I. C. **Tutorial Cálculo da EUPS no programa INVEST**. Presidente Prudente: FCT/UNESP, 2017.

PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: FINEP, ABRH, 2001. 628 p.

PRODANOFF, J. H. A. **Método simplificado de colby**. Versão 0.2. Furnas Centrais Elétricas, 1996.

RIQUIER, J. **Évaluation globale de la dégradation des sols. Nature et Ressources.** Paris: Unesco, 1982. v. 18, n. 2, p. 19-23.

ROCHA, P. C. G. H. Geometria hidráulica e transporte de sedimentos em canais do sistema fluvial do alto rio Paraná, centro-sul do Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 31, n. 61, p. 249-269, 2016.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E. **Camargo, P. B. Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** São Paulo: Ed. RIMA, 2004. 138 p.

STRAND, R. I. **Design of small dams: sedimentation.** Appendix A. Reservoir Sedimentation, 1987. 529 p.

TALLIS, H. *et al.* **InVEST 2.3.0 user's guide:** interated valuation of environmental services and tradeoffs. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <http://www.naturalcapitalproject.org/InVEST>. Acesso em: 01 fev. 2020.

THOMPSON, D.; FIDALGO, E. C. C. Estimativa da perda de solos por meio da equação universal de perdas de solos (EUPS) com uso do Invest para a bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu – RJ. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais [...]** Bento Gonçalves: [s. n.], 2013. 7 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997.

MATOS, A. J. S.; ESTIGONI, M. V.; MAUAD, F. F. **Varição de volume calculado em grandes reservatórios utilizando diferentes metodologias de levantamentos batimétricos.** Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011. 11 p.

VIEIRA DA SILVA, R.C.; WILSON-JR, G. **Hidráulica Fluvial.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2005. v. 2, 255 p.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 65, p. 209-287, 1983.

WALLING, D. E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. **Geomorphology**, [s. l.], v.79, n.3, p.192- 216, 2006.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Washington, DC: USDA, 1978. (Agriculture handbook, 537).

ZANELLA, B. P. **Modelagem do aporte de sedimentos aplicada à Bacia Hidrográfica Contribuinte da PCH Costa Rica (MS) e proposta de mitigação do Assoreamento.** 2016. 143 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2016.