



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA MASSAME ONO

MONITORAMENTO E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO NO RESERVATÓRIO  
PASSAÚNA-PR

CURITIBA

2020

GABRIELA MASSAME ONO

MONITORAMENTO E ANÁLISE DA SEDIMENTAÇÃO NO RESERVATÓRIO  
PASSAÚNA-PR

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Michael Mannich  
Coorientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger

CURITIBA  
2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

O58m Ono, Gabriela Massame  
Monitoramento e análise da sedimentação no reservatório Passaúna - PR [recurso eletrônico] / Gabriela Massame Ono. – Curitiba, 2020.  
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2020.  
Orientador: Michael Mannich.  
Coorientador: Tobias Bleninger.  
1. Reservatórios. 2. Sedimentação e depósitos. 3. Sedimentos fluviais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Mannich, Michael. III. Bleninger, Tobias. IV. Título.

CDD: 627.122

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **GABRIELA MASSAME ONO** intitulada: **Monitoramento e análise da sedimentação no reservatório Passaúna-PR**, sob orientação do Prof. Dr. MICHAEL MANNICH, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 15 de Setembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

17/09/2020 17:38:26.0

MICHAEL MANNICH

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/09/2020 06:37:39.0

STEPHAN HILGERT

Avaliador Externo (KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY)

Assinatura Eletrônica

15/09/2020 14:56:38.0

MAURÍCIO FELGA GOBBI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Dedico esse trabalho à minha família, o Gilberto  
a Cleide e a Isabela, por todo apoio imensurável  
para minha realização pessoal e profissional.*

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela saúde, garra e força determinantes para a execução desse trabalho.

Ao meu pai e minha mãe, minha base e meus exemplos de vida, por sempre acreditarem em mim e incentivarem meus estudos. Tenho sorte de ter pais que me apoiam incondicionalmente. À minha irmã e melhor amiga Isabela que deixa minha vida muita mais leve e feliz. À toda minha família, que sempre está comigo nos momentos de perdas e vitórias.

Ao meu orientador Michael pela dedicação, paciência, além de todos os sábios conselhos técnicos e de vida. Meus sinceros agradecimentos, por me apresentar a área de estudos de reservatórios, a qual me possibilitou muita aprendizagem em campo na coleta de dados, nas análises laboratoriais e o processamento dos dados.

Ao meu amigo parceiro Fayroon, por todo suporte e incentivo, sempre com pensamentos positivos, acreditando sempre no meu potencial. Às minhas amigas de faculdade e depois de mestrado, Anaís e Giovana, que desde 2013 me inspiraram a ser uma pessoa melhor, sempre com boas histórias e risadas compartilhadas na UFPR e na vida. Às minhas melhores amigas, futura médica e psicóloga, Alessandra e Isabela, me socorrendo nos tempos mais difíceis dessa trajetória. A todos os meus amigos de infância e faculdade que sempre estavam torcendo por mim e me incentivando, principalmente o Caio, a Alexandra e o Allan.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA), aos funcionários, aos professores e colegas que contribuíram para a minha formação como Mestre em Engenharia Ambiental. Em especial ao professor Tobias, que desde a graduação, sempre esteve disponível para conselhos e contribuiu para os meus trabalhos. Também ao professor Maurício pelas valiosas contribuições como banca da qualificação. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos e incentivo à pesquisa para o desenvolvimento do país. Aos técnicos do laboratório LBEAM e também a Universidade Federal do Paraná (UFPR) que prestaram todo o suporte técnico e científico.

Ao projeto MuDak financiado pelo Ministério Federal Alemão de Educação e Pesquisa, especificamente o Karlsruhe Institute of Technology (KIT) e aos professores Stephan Fuchs e Stephan Hilgert pela disponibilização das armadilhas de sedimento. Além de agradecer cordialmente à Sanepar pelo apoio logístico e acesso ao reservatório Passaúna.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos  
não é senão uma gota de água no mar.  
Mas o mar seria menor se  
lhe faltasse uma gota.”  
(Madre Teresa de Calcutá)*

# RESUMO

Apesar da continuidade de construção de novas barragens, desde os anos 2000, a capacidade de armazenamento global em reservatórios vem diminuindo devido ao assoreamento. No âmbito do Projeto MuDak -WRM, o reservatório Passaúna localizado na região metropolitana de Curitiba, que abastece cerca de 650.000 pessoas, foi escolhido como área de estudo. A perda de volume útil e o acúmulo de nutrientes nesta represa podem prejudicar o abastecimento da região. Com o intuito de avaliar o fluxo de deposição do sedimento, bem como, sua variação espaço-temporal e os nutrientes, foram utilizadas cinco armadilhas de sedimento. Foram instaladas duas armadilhas na superfície na captação (INT S) e na barragem (DAM S) e três armadilhas no fundo, uma na captação (INT B), uma na barragem (DAM B) e a outra no parque (PARK) para o ano de 2018. Já para o ano de 2019, as armadilhas foram instaladas todas a um metro do fundo. Quanto às duas que estavam na superfície, uma delas foi realocada para o braço lateral (ARM) e a outra na ponte Ferrari (PPA). Os equipamentos utilizados são constituídos de PVC e apresentam relação de aspecto de 11 : 1. Os parâmetros matéria orgânica (MO), fósforo total ( $P_T$ ) e nitrogênio total ( $N_T$ ) foram determinados pelos parceiros alemães. Analisando as taxas de sedimentação, obtidas pelo peso seco das amostras pelos dias em exposição de cada coleta, observou-se que a variação no espaço tem maiores taxas a partir da entrada do rio diminuindo gradualmente até a jusante na barragem (5,80 – 0,01 cm/ano). Além disso, as amostras do fundo obtiveram maiores taxas do que as de superfície, causadas pela dinâmica interna do reservatório. Quanto à variação temporal, identificou-se o inverno o período que ocorre a maior sedimentação, o qual acompanha a tendência de chuvas mais intensas. Para a determinação da taxa média de sedimentação utilizou-se duas abordagens, a primeira por média aritmética resultando em 43,71 g/m<sup>2</sup>dia e a segunda pela média ponderada pelas áreas de influência de cada armadilha, 29,49 g/m<sup>2</sup>dia, ambas excluindo os valores da superfície. Com esse fluxo médio foi calculado o tempo médio de vida útil do reservatório, que resultou em 315 anos. De maneira complementar ao resultado das armadilhas, foi aplicado os métodos, de eficiência de retenção de sedimentos, de Brune e o simplificado de Colby, para o cálculo da descarga sólida total. Assim a estimativa do tempo de vida útil resultante desses métodos foi de 3139 anos. Avaliando os teores de MO, nota-se sua porcentagem maior na superfície e nas adjacências da barragem, ou seja, maior produção interna (material autóctone). O fluxo de deposição do  $P_T$  foi de 50,08 mg/m<sup>2</sup>dia, e do  $N_T$  foi de 190,52 mg/m<sup>2</sup>dia. Para ambos os nutrientes seus maiores valores foram ao final do outono e inverno. Em suma, o equipamento traz uma metodologia simples e barata para uma estimativa da taxa de sedimentos em deposição, bem como sua variação temporal e espacial.

**Palavras-chaves:** Reservatório Passaúna. Taxa de sedimentação. Armadilha de Sedimento.



# ABSTRACT

Despite the continuity of construction of new dams, since the 2000s, the global storage capacity in reservoirs has been decreasing, due to siltation. Within the scope of the MuDak-WRM Project, the Passaúna reservoir is located in the metropolitan area of Curitiba and supplies water to 650.000 habitants, on average was chosen as the study area. The loss of storage volume and the accumulation of nutrients due to siltation threatens the drinking water supply. In order to obtain the sedimentation rate, as well as its spatio-temporal variation and the nutrient content of settling particles, due to the importance of the reservoir for this area, five sediment traps were installed within the reservoir. Two traps were installed on the surface at the catchment (INT S) and at the dam (DAM S) and three traps at the bottom of the catchment (INT B), dam (DAM B) and park (PARK) for the year 2018. As for the year 2019, the traps were all installed one meter from the bottom. As for the two surface traps, one was relocated to the side arm (ARM) of the reservoir and the other to the Ferrara bridge (PPA). The traps are made of PVC and have an aspect ratio of 11 : 1. Parameters such as organic matter (OM), total phosphorus ( $P_T$ ) and total nitrogen ( $N_T$ ) were determined by the German partners. In the analysis of sedimentation rates, obtained by the dry weight of the samples for the days on display in the reservoir, it was observed that it varies in space, with higher rates from the river inlet gradually decreasing downstream to the dam (5,80 – 0,01 cm/year). In addition, samples from the bottom of the reservoir obtained higher rates than those from the surface caused by the internal dynamics of the reservoir. As for the temporal variation, it was identified that the winter period is the one that occur the greatest sedimentation, which follows the trend of more intense rains. To determine the final sedimentation rate, two approaches were used, the first by arithmetic mean resulting in 43,71 g/m<sup>2</sup>day and the second by the weighted average by the areas of influence of each trap in 29,49 g/m<sup>2</sup>day, both excluding surface values. In addition, with this general rate, the reservoir's useful life was calculated, which resulted in 315 years. Completely to the result of the traps, Brune's sediment retention efficiency methods were applied. For this, Colby's simplified method was used to calculate the total solid discharge. Thus, the useful life resulting from these methods was 3139 years. Assessing the levels of OM, its higher percentage is noted on the surface and in the vicinity of the dam, that is, greater internal production (autochthonous material). The deposit flow for  $P_T$  was 50,08 mg/m<sup>2</sup>day and  $N_T$  was 190,52 mg/m<sup>2</sup>day. For both nutrients, their highest values were in the end of autumn and winter. In short, the equipment brings a simple and inexpensive methodology for estimating the rate of deposited sediments, as well as their temporal and spatial variation.

**Key-words:** Passaúna Reservoir. Sedimentation rate. Sediment trap.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração da entrada do rio em lagos e reservatórios juntamente a pluma de sedimentos e sua deposição, dando origem ao processo de assoreamento. Adaptado de Schillereff (2015). . . . .	22
Figura 2 – Volume líquido global de armazenamento de reservatórios, de acordo com a perda de armazenamento resultante da sedimentação, adaptado de Abderrezzak e Findikakis (2018). . . . .	23
Figura 3 – Esquema de equipamentos de monitoramento por: A) Diferença de pressão, B) Óptica volumétrica, C) Acústica e D) Difração de <i>laser</i> , adaptado de Schillereff (2015). . . . .	25
Figura 4 – Equipamentos de medição de sedimento em transporte: A) Garrafa Delft, para medida direta da concentração, B) Amostrador tipo Petersen, para amostragem do material de leito e C) Amostrador de saca compressível, para sedimento em suspensão. Fonte: Carvalho et al. (2000b). . . . .	27
Figura 5 – Ilustrações de algumas armadilhas de sedimento, observar-se: A) o modelo com recipiente removível e os dois tubos paralelos e próximos para haver duplicata da amostra, B) um conjunto de armadilhas úteis para zonas de baixa sedimentação (oceanos) e C) os tubos em paralelo, porém com uma distância maior entre si, adaptado de Schillereff (2015). . . . .	31
Figura 6 – Curva de eficiência de retenção de sedimento em grandes e médios reservatórios. Fonte: Carvalho et al. (2000a). . . . .	33
Figura 7 – Curva de eficiência de retenção de sedimento em pequenos reservatórios. Fonte: Carvalho et al. (2000a). . . . .	34
Figura 8 – Localização da área de estudo. . . . .	41
Figura 9 – A) Estrutura central de PVC resistente, onde são acoplados os tubos transparentes, as mangueiras de extravasamento e os amostradores, B) armadilha completa sendo instalada no reservatório, com ajuda do guidaste do barco. Fonte: UWITEC (2018). . . . .	46
Figura 10 – Localização das armadilhas para o ano de 2018 e 2019. . . . .	47
Figura 11 – Ilustração da configuração da armadilha na coluna d'água, uma instalada na posição superfície a 2 metros abaixo do nível do reservatório e a outra armadilha, na posição fundo a 1 metro do sedimento. Em todas as armadilhas houve a adição de boias, tanto para identificação na superfície quanto para mantê-las na vertical na coluna d'água. . . . .	48
Figura 12 – Invasão do equipamento de fundo na captação, pelo peixe. Esta coleta ficou comprometida e foi descartada. . . . .	49

Figura 13	–Barco com o guindaste utilizado nas campanhas de coleta. . . . .	50
Figura 14	–Precipitação acumulada mensal e vazão mensal do rio Passaúna nos anos de monitoramento. Os números indicam as coletas e o período em que ocorreram. . . . .	51
Figura 15	–Amostras em análise no laboratório da UFPR. A foto à esquerda é uma amostra bruta, com o recipiente cheio de água e sedimento abaixo. O aspecto e coloração do frasco é característico do ponto PARK, de difícil remoção na lavagem após a análise. A foto à direita registra as amostras secas nos tubos <i>falcon</i> após a estufa, prontas para serem desagregadas e pesadas. . . . .	52
Figura 16	–Áreas para o cálculo da média ponderada, calculadas pelo Qgis. A área A1 inclui a área alagada, entrada do reservatório, até o parque Passaúna, a área A2 (em amarelo) vai do parque até o braço lateral e a área A3 engloba o braço lateral se estendendo até a barragem. . . . .	53
Figura 17	–Variação espacial da taxa de sedimentação da massa acumulada nas armadilhas. . . . .	57
Figura 18	–Taxa de sedimentação por armadilha de sedimento. . . . .	59
Figura 19	–Variação temporal da taxa de sedimentação da massa acumulada. O primeiro intervalo da cor azul representa o período da instalação das armadilhas até a primeira coleta, já a cor azul claro, o período da coleta 1 até a 2, assim por diante até a 8. Essa separação por cor, ajuda a identificar a tendência temporal das taxas. . . . .	60
Figura 20	–Média das taxas de sedimentação e precipitação acumulada por coleta. . . . .	62
Figura 21	–Distribuição da taxa de sedimentação ao longo do reservatório. . . . .	63
Figura 22	–Recipiente da armadilha <i>Intake</i> , posicionada na superfície, da coleta 3 em 2018. . . . .	66
Figura 23	–Matéria orgânica ao longo do reservatório. . . . .	67
Figura 24	–Variação espacial da taxa de sedimentação do $P_T$ . . . . .	69
Figura 25	–Variação temporal da taxa de sedimentação do $P_T$ . Cada <i>box plot</i> contém todos os valores de todas as armadilhas de uma coleta. Os meses entre cada um, estão representados por cores diferentes como mostrados no gráfico. O primeiro tom de azul representa o período da coleta 1 a até a 2, o tom mais claro da 2 até a 3, alternando assim até a 7. Essa separação por coleta, ajuda na identificação da tendência temporal das taxas. . . . .	70
Figura 26	–Variação espacial da taxa de sedimentação do $N_T$ . . . . .	71

Figura 27 –Variação temporal da taxa de sedimentação do $N_T$ . Igualmente ao fósforo, cada <i>box plot</i> contém todos os valores de todas as armadilhas de uma coleta. Os meses entre cada um, estão representados por cores diferentes como mostradas no gráfico. O primeiro tom de azul representa o período da coleta 1 a até a 2, o tom mais claro da 2 até a 3, alternando assim até a 7. . . . .	72
Figura 28 –Curva-chave de sedimentos do reservatório Passaúna. . . . .	88
Figura 29 –Eficiência de retenção de sedimento do reservatório Passaúna, pelo método de Brune. . . . .	88
Figura 30 –Vazão do rio Passaúna pela descarga sólida total. . . . .	89
Figura 31 –Descarga sólida e vazão do rio Passaúna ao longo dos anos. . . . .	89

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo dos autores e taxas de sedimentação encontrados na literatura. Legenda: A - Armadilha de Sedimento; N - Núcleo de Sedimento. . . .	23
Tabela 2 – Resumo das informações do reservatório, baseados em Godoy (2017), Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) e dados não publicados pela Sanepar.	43
Tabela 3 – Médias anuais de Fósforo Total, Nitrogênio Total e DQO, baseados em IAP (2017). . . . .	44
Tabela 4 – Dimensões da armadilha de sedimentos. Fonte: UWITEC (2018). . . .	46
Tabela 5 – Coordenadas geográficas e médias das profundidades das armadilhas em 2018 e 2019. . . . .	47
Tabela 6 – Datas das coletas das amostras. . . . .	49
Tabela 7 – Cota, área e volume do Reservatório. Fonte: MuDak, 2019. . . . .	54
Tabela 8 – Distância longitudinal de cada armadilha em relação a entrada do rio Passaúna no reservatório. . . . .	57
Tabela 9 – Tempo de vida útil do reservatório Passaúna pelas armadilhas de sedi- mento. . . . .	65
Tabela 10 – Resumo do tempo de vida útil do reservatório Passaúna. . . . .	65
Tabela 11 – Teor de matéria orgânica (%) nas armadilhas. . . . .	66
Tabela 12 – Valores de $a$ e $b$ para $C_R$ em função da profundidade média. Fonte: (PAIVA, 1988 apud SCAPIN, 2005). . . . .	87

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	MuDak - WRM	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	Objetivos Específicos	18
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>19</b>
2.1	Assoreamento em Reservatórios	20
2.1.1	Erosão, Transporte e Deposição de Sedimentos	20
2.1.2	Situação Global	22
2.2	Monitoramento de Sedimentos	24
2.2.1	Medição de Concentração	24
2.2.2	Medição de Transporte	26
2.2.3	Medição de Sedimentação	28
2.2.3.1	Medições acústicas	28
2.2.3.2	Amostragem por Testemunho	29
2.2.3.3	Armadilha de Sedimento	30
2.3	Eficiência de Retenção de Sedimento	32
2.3.1	Descarga Sólida Total	34
2.3.2	Tempo de Vida Útil do Reservatório	35
2.3.3	Peso Específico Aparente dos Depósitos	35
2.4	Nutrientes nos Sedimentos de Reservatórios	36
2.5	Avaliação do sedimento no Reservatório Passaúna	38
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>40</b>
3.1	Área de Estudo	40
3.1.1	Localização	40
3.1.2	Caracterização Física	42
3.1.3	Uso e Ocupação do Solo	44
3.2	Metodologia para Avaliação de Assoreamento	45
3.2.1	Equipamento: <i>Sediment Trap</i>	45
3.2.1.1	Estratégias de Monitoramento	46
3.2.1.2	Condicionantes Meteorológicas	50
3.2.1.3	Procedimentos Laboratoriais	51
3.2.1.4	Cálculo da Taxa de Sedimentação	52
3.2.2	Método de Brune	55

<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>56</b>
4.1	Avaliação da Taxa de Sedimentação	56
4.1.1	Variação Espacial	56
4.1.2	Variação Temporal	60
4.1.3	Estimativa da Vida Útil do Reservatório	62
4.2	Avaliação da Matéria Orgânica	65
4.3	Avaliação do Fósforo Total	68
4.4	Avaliação do Nitrogênio Total	70
4.5	Implicações para Gestão	73
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>76</b>
5.1	Considerações Finais	76
	<b>Referências</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>Eficiência de Retenção de Sedimentos no Reservatório</b>	
	<b>Passaúna</b>	<b>86</b>
A.1	Método Simplificado de Colby	86
A.2	Método de Brune	87

# 1 Introdução

*“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”*

C. Lévi-Strauss (2008)

Frente à expectativa do aumento populacional mundial, crescem também as demandas por garantia do uso da água, com uma conseqüente intensificação das construções de novas barragens. Além disso, há uma mudança do uso e ocupação do solo das bacias hidrográficas, como a expansão da agricultura e a urbanização, que por conseqüência acabam aumentando o material sólido para os rios, onde são carregados para os reservatórios e lagos. No entanto, de acordo com o ICOLD (2018), o volume de água acrescido das novas instalações de represas, não supera a diminuição do volume útil global de armazenamento de água, devido à sedimentação, ocasionando o assoreamento. Em virtude desta redução de estocagem da água nos corpos hídricos, muitos pesquisadores já têm se dedicado ao tema, em âmbito internacional desde a década de 30 (FLOCK, 1934) e no Brasil desde a década de 80 (PONÇANO et al., 1981). Estudos sobre as limitações do assoreamento em reservatórios e estratégias para mitigar essa problemática vêm sendo considerados de grande relevância.

De acordo com Leite (1998), a compreensão do processo de sedimentação é essencial para o entendimento dos ecossistemas aquáticos, especialmente com relação à produção primária e à decomposição de matéria orgânica. O entendimento desse fenômeno também contribui em relação à eutrofização, visto que o material carregado para dentro do reservatório é decomposto, utiliza oxigênio da água e libera nutrientes. Estes e outros compostos são transportados pelo sedimento, aceleram o crescimento de animais e algas, que conseqüentemente morrem, se depositam no fundo do reservatório e contribuem como sedimentos de origem autóctone.

Além disso, o monitoramento da deposição de sedimentos em corpos hídricos é de fundamental importância, seja para garantir os padrões aceitáveis das águas para seus diversificados usos, quanto para prolongar a vida útil das barragens, para que as mesmas não sejam retiradas de serviço, causando problemas como o descomissionamento da barragem e o manejo dos sedimentos do reservatório.

A sedimentação também pode alterar a morfologia do rio nas partes a jusante e a montante. Portanto, é necessário estudar métodos de análise e previsão da produção de sedimentos e perceber quais fatores são determinantes para a taxa de sedimentação nesses ambientes. Isso permite que medidas efetivas sejam tomadas para combater esse processo em reservatórios, assegurando os ciclos hidrológicos e de transporte de sedimentos que suportam várias funções ecológicas do sistema fluvial.



Diante do exposto, o prognóstico da sedimentação em lagos artificiais é de grande complexidade, face às inúmeras variáveis entre solo e sua cobertura, geologia e condições climáticas. Contudo, existem técnicas de avaliação de assoreamento bem consolidadas na literatura como, por exemplo, o método de Brune (BRUNE, 1953), a batimetria (OLADOSU et al., 2019), modelos numéricos (SOUZA; VILLELA; SCHULZ, 2006), medições diretas (MICHALEC; TARNAWSKI, 2006), entre outras. Cada metodologia possui seu enredamento e viés, como a modelagem matemática que tem seu uso e confiabilidade de resultados limitados, devido às incertezas e à fixação de vários parâmetros (ARAÚJO, 2000).

Brune (1953) sugere uma relação empírica para estimar o porcentual de eficiência de retenção de sedimentos no represamento de um rio, baseado na quantidade de sedimento e no volume afluente. Com dados de descarga sólida do afluente, são originadas curvas de eficiência de retenção de sedimentos. Além disso, o gráfico para obtenção da eficiência é composto por três curvas, uma mediana e duas envelopes, as quais fornecem informações para a estimativa do assoreamento.

Sobretudo, de acordo com Schillereff (2015), é um grande desafio realizar medições diretas no reservatório de maneira a representar a variabilidade espacial e temporal adequada das amostras de sedimento para análise. Adicionalmente, as armadilhas de sedimento são instrumentos que podem fornecer uma aquisição de dados de alta qualidade para analisar a sedimentação.

Este equipamento é utilizado *in situ* para mediação direta do fluxo de deposição de material suspenso em reservatórios. Inclusive, a amostra coletada pode ser levada para laboratório para realização de outras análises, uma vez que, os sedimentos são um dos maiores poluidores de água. Ainda, podem funcionar como catalisadores e agentes fixadores para outros agentes poluidores (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004).

Dessa maneira, a perda de volume de armazenamento e o acúmulo de nutrientes devido ao assoreamento em reservatórios podem ser prejudiciais ao abastecimento público, além de diminuir o tempo de vida útil. A quantidade de entrada de sedimentos e produção interna determinam a taxa de sedimentação, a qual é um indicativo importante para o gerenciamento de reservatórios. Assim, a hipótese do presente trabalho é que medições com as armadilhas de sedimento, distribuídas ao longo do reservatório permitam a análise espaço-temporal da sedimentação, que contribuem diretamente para melhorar o gerenciamento do corpo hídrico. Portanto, esse trabalho tem o objetivo de estudar a taxa de sedimentação do reservatório Passaúna, bem como os nutrientes do sedimento, utilizando como equipamento a armadilha de sedimentos e compará-los com outros dados e outros métodos, verificando a eficácia do equipamento utilizado.

Este estudo está estruturado com a introdução, os objetivos, a revisão bibliográfica, os materiais e métodos, resultados e discussão e a conclusão. A revisão bibliográfica possui um embasamento técnico científico, para contextualizar os objetivos e a metodologia aplicada,

sobre o uso da armadilha de sedimentos e a determinação da taxa de sedimentação do reservatório Passaúna. Em materiais e métodos foi apresentada a área de estudo, bem como as estratégias de monitoramento e os procedimentos após a coleta de dados e o processamento dos mesmos. Na parte dos resultados e discussão, foram expostas as taxas de sedimentação das coletas realizadas, em forma de gráficos, também as visualizações da variação temporal e espacial das taxas, além de extrapolações quanto à vida útil do reservatório. A análise da distribuição dos nutrientes também foi explorada, juntamente a possíveis ações para a gestão desse reservatório. Por fim, na conclusão são expostos os resultados finais com seus respectivos impactos no reservatório.

## 1.1 MuDak - WRM

A escolha da área de estudo – Reservatório Passaúna – se deu no âmbito do projeto MuDak-WRM (Multidisciplinary Data Acquisition as Key for a Globally Applicable Water Resource Management, <https://www.mudak-wrm.kit.edu/>), que consiste na cooperação Brasil-Alemanha por intermédio de Instituições brasileiras e alemãs para o fomento de pesquisas, visando o desenvolvimento sustentável. Esse reservatório, possui grande importância social, econômica e ambiental para Curitiba e região metropolitana, pois é responsável pelo abastecimento público desta região.

O objetivo principal do MuDaK-WRM é desenvolver um modelo para a previsão de mudanças de médio a longo prazo em reservatórios de água de maneira otimizada. A essência é reduzir a complexidade das abordagens científicas subjacentes, encontrando os dados necessários para o futuro modelo, a fim de reduzir o esforço de aplicação de maneira significativa nos países em desenvolvimento, para o gerenciamento de recursos hídricos. A identificação de todos os parâmetros relevantes que influenciam o comportamento a longo prazo do reservatório, o desenvolvimento de um conceito mínimo de monitoramento, a redução da complexidade e demanda de dados de determinadas abordagens e o desenvolvimento de uma ferramenta globalmente aplicável para os recursos hídricos superficiais, são algumas das ações que estão sendo aplicadas. Além deste, alguns trabalhos já foram desenvolvidos no reservatório no contexto desse Projeto, ebulição de gases (MARCON, 2018), classificação de sedimentos (SOTIRI; HILGERT; FUCHS, 2019), entre outros.

Algumas das instituições envolvidas são: Universidade Federal do Paraná, Karlsruhe Institute of Technology, Universidade Positivo (UP), Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), Instituto das Águas do Paraná (AguaParaná), Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER).

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação visa mensurar a taxa de sedimentação do reservatório Passaúna, com a utilização de armadilhas de sedimento.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos consistem em:

- Estudar a variação espacial e temporal das taxas de sedimentação, ao longo do reservatório e a sazonalidade, respectivamente;
- Estimar o tempo de vida útil do reservatório, com base nos fluxos de deposição, e compará-lo ao tempo de outros métodos e estudos;
- Estudar a variação da matéria orgânica das partículas sólidas em deposição na represa;
- Estimar a taxa de sedimentação do fósforo e nitrogênio total do sedimento, bem como suas variações espaço-temporais;
- Estimar o coeficiente de correlação das taxas com a profundidade das armadilhas.

## 2 Revisão Bibliográfica

*“[...] Existem mais de 59.071 grandes barragens (...), mas a capacidade de armazenamento global em reservatórios vem diminuindo desde os anos 2000 (...), pois estão sendo preenchidos com sedimentos.”*

CIGB (2018)

Neste capítulo foram revisados alguns conceitos importantes para a compreensão do processo de assoreamento que ocorre em reservatórios e, por conseguinte, na área de estudo. Algumas formas de monitoramento deste processo também foram abordados. Além disso, foram apresentados alguns estudos de caso e os conceitos da metodologia empregada nesta pesquisa.

No tópico 2.1 é explicado como se desenvolve o assoreamento e as suas principais consequências para o meio ambiente. É apresentado um panorama sobre o armazenamento global de água em reservatórios que vêm diminuindo sua capacidade devido à esse fenômeno. Contêm algumas taxas de sedimentação de ambientes aquáticos encontradas na literatura, para trazer uma concepção da ordem de grandeza, enfatizando a relevância desse índice para a gestão de reservatórios.

De acordo com esses estudos referidos, revela-se a importância do conhecimento sobre os métodos e equipamentos utilizados para monitorar os sedimentos nos ambientes aquáticos, os quais estão incluídos no tópico 2.2. Para um melhor entendimento sobre as técnicas aplicadas, elas foram separadas em medições da concentração do sedimento em suspensão no corpo receptor, em medições de transporte que ocorrem antes da descarga sólida adentrar no reservatório e, por fim, em medições de sedimentação que são as mais usuais, avaliando o material já depositado ou em deposição.

Além de práticas e equipamentos para monitorar o sedimento, na seção 2.3 foram explicitados alguns métodos para o cálculo do assoreamento, como os métodos de eficiência de retenção de sedimentos no reservatório. O método de Brune é aplicado para médios e grandes lagos e o método de Churchill para reservatórios pequenos. Foram retratados alguns métodos do cálculo da descarga sólida, como o método de Colby, para a determinação da curva-chave de sedimento, utilizadas para os cálculos de retenção. Outro parâmetro importante que foi explicado é o cálculo da vida útil do reservatório.

Para concluir esse capítulo, no tópico 2.4 discutiu-se sobre os nutrientes (fósforo e nitrogênio) que os sedimentos carregam para dentro dos reservatórios e como podem ser disponibilizados nesses ambientes. Além disso, na seção 2.5 buscou-se sintetizar algumas informações já levantadas sobre o sedimento da represa do Passaúna.

## 2.1 Assoreamento em Reservatórios

### 2.1.1 Erosão, Transporte e Deposição de Sedimentos

A água e seu escoamento são responsáveis e propulsores dos três processos para o assoreamento: a erosão, o transporte e a deposição dos sedimentos. O material sedimentado nas barragens pode ser atribuído a erosão do solo das bacias hidrográficas. Este processo é natural, mas devido às intervenções antrópicas no uso do solo, tem se tornado acelerado. As atividades mais comuns são a mudança da cobertura vegetal natural pela implementação por agricultura, urbanização, construção de rodovias, entre outras. Quando há remoção da mata original, a porção superior do solo fica exposta à ação erosiva da precipitação fazendo com que a chuva caia no solo com maior intensidade, desagrupando as partículas da superfície do solo (SIMÕES et al., 2003).

O intemperismo, o uso e a ocupação do solo em bacias hidrográficas, são alguns dos processos erosivos que permitem que o sedimento através do escoamento superficial seja carregado para canais fluviais, que por sua vez, dependem da energia de escoamento e dos regimes sazonais. Se a energia for baixa, ocorre o depósito desse sedimento ao longo da bacia, se alta, podem transportar esse material para uma bacia sedimentar e para os oceanos. Neste sentido, o escoamento superficial acaba carregando não só a água, mas também a erosão hídrica para as redes fluviais. Então, os rios são os principais meios de transporte de sedimento dos continentes para os oceanos, tanto pela descarga líquida (água) quanto pela descarga sólida (água e sedimentos) (CARVALHO, 2008; PERRY; TAYLOR, 2009).

Os processos de transporte são diferenciados de acordo com as condições do local e do escoamento. Se o escoamento é laminar (número de Reynolds  $<500$ ), só as partículas do tamanho do grão de argila se movem. Por outro lado, se o escoamento for turbulento (número de Reynolds  $>2000$ ), dependendo da sua velocidade, ele transporta materiais que variam seus tamanhos de grão entre as argilas e os seixos. Além disso, as forças que atuam nessa partículas, podem mantê-las rolando ou deslizando ao longo do leito (*transporte por arraste*), saltando do leito para o escoamento (*transporte por saltação*), em suspensão (*transporte em suspensão*) ou, no fundo do rio (VANONI, 1977; CARVALHO, 2008; ZANIN, 2015).

Yang (1996) e Branco (1998), afirmam que em rios naturais o transporte de sedimentos ocorre principalmente como carga suspensa. Isso ocorre devido à pequena densidade das partículas suspensas, que propiciam que elas sejam transportadas em diferentes velocidades do escoamento fluvial, sendo depositadas somente em velocidades do escoamento bastante reduzidas. Isso representa cerca de 90% da descarga de sedimentos total. A outra parcela do transporte, necessita de vazões aumentadas para entrarem em movimento (por arraste e saltação), e isso ocorre com menor proporção.

Além disso, barreiras fluviais (barragens) são construídas pela necessidade humana,

para auxiliar na produção de energia elétrica, abastecimento público, irrigação, controle de cheia e secas, recarga do lençol freático, navegações, conservação da vida de peixes e espécies nativas e recreação. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2019), as barragens são as estruturas físicas que represam um curso de água e os reservatórios são o acúmulo de água resultante da construção dessas barragens pelo ser humano.

No entanto, com a construção de barragens, o percurso natural do rio é interrompido e o transporte de sedimentos é alterado. Impedindo desta forma que a descarga sólida do rio seja carregada para fora das bacias hidrográficas. Além do mais, o lago construído modifica a dinâmica hidráulica dos rios afluentes, por haver a redução da velocidade do escoamento pelo aumento da seção molhada, o que deste modo favorece a sedimentação no reservatório (INFANTI; FORNASARI, 2003; COIADO; PAIVA; PAIVA, 2003).

Então, pode se afirmar que os reservatórios atuam como sistemas mistos que recebem água de um rio e todo o material carregado por ele. Com o aumento da seção transversal corrente, ocorre a queda da turbulência do fluxo, reduzindo o transporte do sedimento carregado pelo rio, ocorrendo a sedimentação do material em suspensão (CABRAL, 2005). Isso ocorre devido à superação das forças longitudinais da corrente pelas forças gravitacionais. As partículas com os menores diâmetros são sedimentadas nas proximidades da barragem, enquanto as maiores são as primeiras a se depositar no reservatório (SANTOS; CUNHA, 2015). Por isso, segundo Thornton, Kimmel e Payne (1990) o padrão geral de sedimentação é essencialmente o mesmo para todos os reservatórios: o rio com alta velocidade e turbulência enche o lago construído, onde o fluxo é lento e a carga de entrada de sedimentos é depositada diferencialmente ao longo do reservatório.

O processo de acumulação de sedimentos em reservatórios é chamado de assoreamento, esquematizado na Figura 1, causando a redução da vida útil, devido à diminuição do volume de água pelo preenchimento de sedimentos. De acordo com Abderrezzak e Findikakis (2018), isto inclui perdas de armazenamento e eficiência – menor capacidade de reduzir inundações e prevenir secas e armazenar água para abastecimento doméstico e irrigação, menor potencial para geração de eletricidade – e maiores custos de manutenção com dragagem, por exemplo.

De acordo com Carvalho et al. (2000a), os sedimentos se depositam de montante em direção à jusante. A deposição a montante é chamada de depósito de remanso (*backwater deposit*). As deposições dentro do reservatório podem ser denominadas de delta (*delta*) formadas por sedimentos mais grossos, depósito de margem (*overbank*) e depósito de leito (*bottom-set deposit*). Ainda, condições meteorológicas mais intensas como enchentes, podem originar depósitos de várzea ou de planície de inundação, formado de sedimentos finos e grossos.

Além disso, segundo Zanin (2015) o aporte de sedimentos no reservatório pode causar problemas geomorfológicos a jusante da represa, devido ao empobrecimento sedimentar. Neste contexto, o fluxo original do rio tem a redução de sedimentos que são essenciais

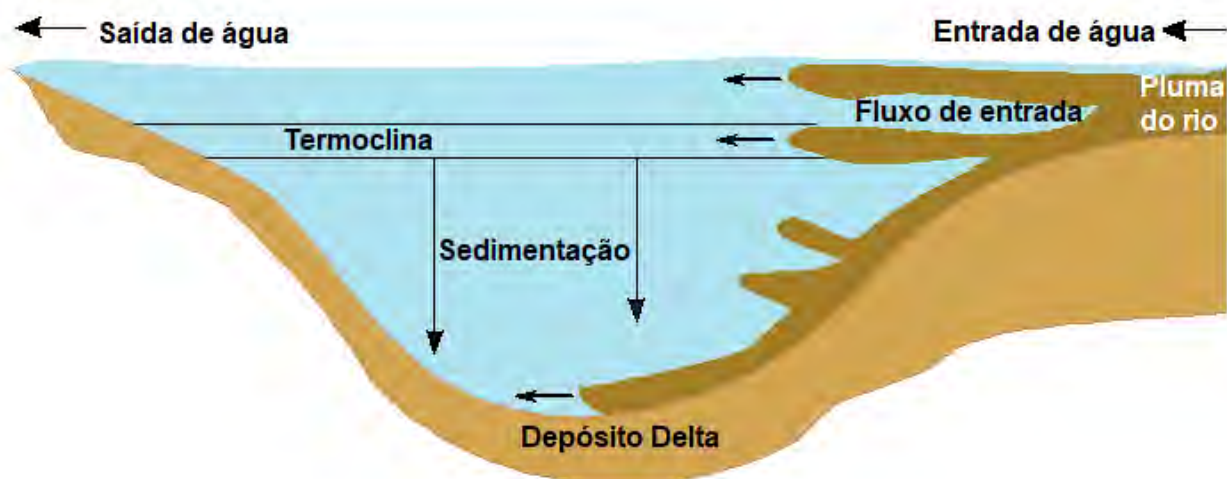


Figura 1 – Ilustração da entrada do rio em lagos e reservatórios juntamente a pluma de sedimentos e sua deposição, dando origem ao processo de assoreamento. Adaptado de Schillereff (2015).

para manter a forma do canal fluvial e os *habitats* aquáticos, transformando os canais a jusante de sistemas dinamicamente ativos e espacialmente complexos em mais estáticos e homogêneos, afetando a flora e a fauna do meio aquático. A quantidade de sedimentos lançados nos oceanos pelos rios também é reduzida, o que resulta no aumento da erosão costeira e no recuo de muitos deltas de rios (ABDERREZZAK; FINDIKAKIS, 2018).

Consoante com Abderrezzak e Findikakis (2018), outra variável que agrava a sedimentação em corpos hídricos são as mudanças climáticas, pois causam maiores variabilidades hidrológicas demandando mais reservatórios para garantirem segurança hídrica. Essa variável com o aumento do desmatamento, eleva a erosão da bacia, conseqüentemente, crescem as cargas de sedimentos depositados nos rios, os quais descarregam mais material sólido no reservatório.

### 2.1.2 Situação Global

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), estimou em 2018 que existem mais de 59.071 grandes barragens, com profundidades superiores a 15 metros. Essas estruturas juntas, têm uma capacidade bruta de 7 trilhões de metros cúbicos. Apesar da continuidade de construção de novas barragens, a capacidade de armazenamento global em reservatórios vem diminuindo desde os anos 2000, pois os mesmos estão sendo preenchidos com sedimentos (ICOLD, 2018).

A taxa de sedimentação varia de reservatório para reservatório e é específica do local, por exemplo, a perda média anual de armazenamento da China é 2,3% e na América do Norte é 0,68%. Desde o final da década de 90, a taxa global de diminuição do volume útil devido à sedimentação ultrapassou a taxa de construção de novas instalações, e sem novas ações, um quarto de todos os reservatórios perderá seu volume para sedimentação nos próximos 25 a 50 anos (Figura 2). O combate à perda de armazenamento corresponde

Tabela 1 – Resumo dos autores e taxas de sedimentação encontrados na literatura. Legenda: A - Armadilha de Sedimento; N - Núcleo de Sedimento.

Autor	Local	Área (km <sup>2</sup> )	Medição	Sedimentação (g · m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )
Chalar e Tundisi, 2001	Reservatório	6,8	A	2,92
Moreno e Ramirez, 2010	Reservatório	1,2 × 10 <sup>7</sup>	A	4,54 × 10 <sup>3</sup>
Kunz et al., 2011	Lago	5,4 × 10 <sup>3</sup>	N	2,19 – 8,49
Schiefer et al., 2018	Lago	26,0	N e A	(805 – 3643) × 10 <sup>3</sup>

à adição de cerca de 50 bilhões de metros cúbicos de armazenamento por ano em todo o mundo, com um custo de reposição de aproximadamente U\$ 18 bilhões. Estratégias eficientes e medidas devem ser tomadas contra a sedimentação em reservatórios, visto que com o alcance da vida projetada, as barragens e os reservatórios devem ter seu uso desativado, deixando as futuras gerações lidando com o desmantelamento de barragens e o manuseio dos sedimentos do reservatório (ABDERREZZAK; FINDIKAKIS, 2018).

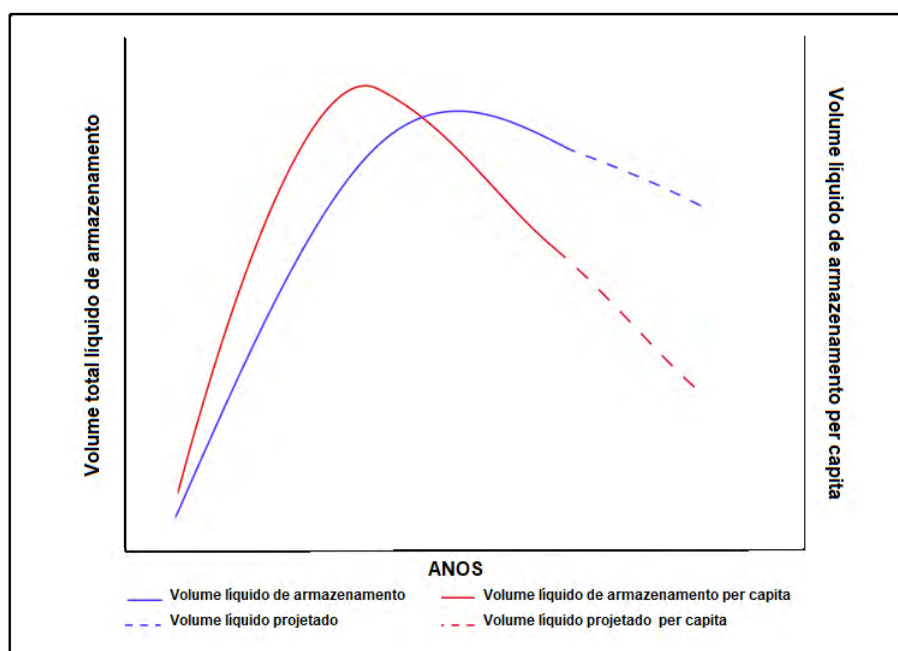


Figura 2 – Volume líquido global de armazenamento de reservatórios, de acordo com a perda de armazenamento resultante da sedimentação, adaptado de Abderrezzak e Findikakis (2018).

É evidente a importância de compreender a dinâmica de sedimentação nesses ambientes, para, por exemplo, obter respostas à desestabilização da vegetação do solo da bacia hidrográfica (FOSTER et al., 2003) ou para avaliar os componentes químicos que estão presentes no sedimento visando a contribuição desses elementos na emissão de gases, efeito estufa (MENDONÇA et al., 2017), entre outros. A Tabela 1 contém alguns métodos para a obtenção da taxa de sedimentação, bem como, as respectivas taxas encontradas, onde podem ser observadas e comparadas.



Além disso, segundo Chalar e Tundisi (2001) a taxa de sedimentação é um parâmetro essencial para modelos computacionais que calculam balanços de massas e recuperação de lagos e reservatórios. Por isso, esses autores dedicaram sua pesquisa em encontrar a taxa de sedimentação do reservatório Lobo-Broa em São Paulo. Por outro lado, Moreno e Ramirez (2010), avaliaram a taxa de sedimentação e sua variação temporal para compreenderem melhor a taxa de mineralização do material que chega ao sedimento. Kunz et al. (2011), com o mesmo intuito estudaram a taxa de sedimentação do maior reservatório de energia hidrelétrica do rio Zambeze, analisando taxas de componentes químicas, tais como, fósforo total (P), nitrogênio total (N), e matéria orgânica (MO), verificando o aporte dos mesmos no sedimento, avaliando o impacto da falta desses nutrientes nos ecossistemas a jusante da barragem.

Schiefer et al. (2018) extrapolaram a taxa de sedimentação de um lago, buscando estimar as taxas do passado e do presente de um lago, que passa parte do ano congelado, localizado na Bacia hidrográfica do Alto Ártico através de dados de campo e modelagem. Com isso, conseguiram estimar a taxa de sedimentação para o futuro e entender a transferência de sedimentos da bacia. Identificaram também as grandes variáveis que influenciam na taxa de sedimentação, sendo elas, a histerese diurna (aparecimento de um atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro afetando a produção primária), temperatura do ar e precipitação.

## 2.2 Monitoramento de Sedimentos

Antes de equacionar as taxas e as quantidades de sedimento nos corpos hídricos e utilizá-las em modelos numéricos, necessita-se de dados coletados do local de estudo. Existem alguns métodos para monitoramento dos sedimentos nos corpos hídricos mais sofisticados que outros. Devido à complexidade das dinâmicas internas dos reservatórios – correntes de turbidez, ressuspensão, etc., além dos processos associados as características do sedimento – floculação e remobilização, exige-se uma boa acurácia na escolha das técnicas de coleta de dados. Para auxiliar na tomada de decisão, dividiu-se o monitoramento e coleta de dados em medições de concentração, transporte e sedimentação.

### 2.2.1 Medição de Concentração

De acordo com Schillereff (2015), os materiais depositados nos lagos são compostos predominantemente de partículas suspensas coesas de grão fino. O autor afirma que os métodos tradicionais de monitoramento de sedimentos em suspensão, consistem na amostragem em intervalos discretos. Entretanto, essas técnicas têm sido substituídas por dispositivos que fazem a medição em *in situ* quase em tempo real. Esses novos equipamentos são baseados nos princípios de diferença de pressão, óptica volumétrica, óptica a *laser* e retroespalhamento acústico, os quais estão ilustrados na Figura 3.

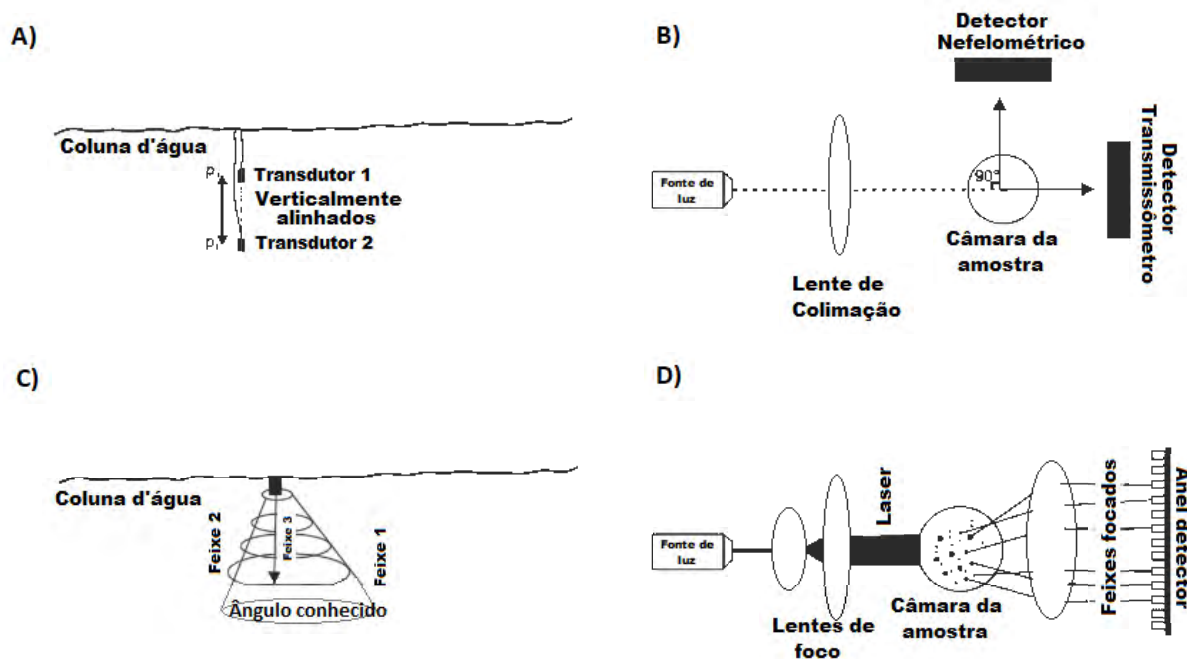


Figura 3 – Esquema de equipamentos de monitoramento por: A) Diferença de pressão, B) Óptica volumétrica, C) Acústica e D) Difração de *laser*, adaptado de Schillereff (2015).

A técnica de monitoramento de concentração de sólidos suspensos (CSS) por diferencial de pressão, na Figura 3 A), consiste em inferir CSS a partir de estimativas da densidade da água. São baseadas em medições simultâneas da pressão da água de transdutores fixados em duas profundidades conhecidas e corrigidos para a temperatura da água. Entretanto, esta técnica se torna potencialmente inadequada para lagos termicamente estratificados, sabendo que as águas com temperaturas mais baixas são mais densas que as águas com maiores temperaturas (SCHILLEREFF, 2015; GRAY; GARTNER, 2009).

Os turbidímetros ópticos, na Figura 3 B), medem a quantidade de luz que chega ao detector, o qual, refletirá a claridade ou a turbidez da água. Existem duas maneiras que podem ser empregadas: uma é pela transmissometria (uma medida da fração da luz visível que chega a um detector a partir de uma fonte diretamente alinhada) ou outra pela nefelometria (o retroespalhamento óptico da luz incidente a  $90^\circ$  dentro de uma câmara, em espectros visíveis ou infravermelho (IV)). Estes valores são calibrados por medições empíricas que devem ser realizadas no local da área que se deseja estudar. Todavia, esse equipamento pode ter suas leituras prejudicadas, quando as concentrações de partículas forem excepcionalmente altas (SCHILLEREFF, 2015; GRAY; GARTNER, 2009).

Já sob a perspectiva das técnicas de retroespalhamento acústico, na Figura 3 C), tipicamente usando um perfilador de corrente Doppler (ADCP) (GUERRERO; RÜTHER; SZUPIANY, 2012), a partir das distâncias verticais, fornecem informações sobre o movimento do material suspenso. Fundamentalmente, os pulsos sonoros de alta frequência, emitidos sequencialmente a partir de transdutores do equipamento, repercutem em intensi-

dades que refletem a concentração de partículas suspensas na coluna de água (GUERRERO; RÜTHER; SZUPIANY, 2011). Considera-se que a sensibilidade ótima do ADCP está na faixa de areia grossa, contudo, esta faixa de tamanho de partículas raramente é fornecida aos lagos (SCHILLEREFF, 2015).

Os dispositivos ópticos a *laser*, comumente chamados de LISST (*laser in situ scattering and transmissiometry*) na Figura 3 D), operam pela teoria de difração a *laser*, onde o ângulo de dispersão (difração) de um feixe de *laser*, ao atingir uma partícula esférica, é definido em função do diâmetro da mesma. Quando um feixe de *laser* é emitido pela fonte de luz, em uma massa de partículas retidas em suspensão, as concentrações de sedimentos em suspensão e o espectro de tamanhos de partículas são calculados, a partir do padrão de dispersão detectado por um sensor de anel (AGRAWAL et al., 2008). Este equipamento pode superestimar CSS em 1,5 a 8 vezes a real concentração, quando a carga de sedimentos é predominantemente composta por partículas recém-erodidas. Principalmente quando existe alta proporção de partículas mais finas do que os limites operacionais do instrumento, os valores de CSS também podem ficar distorcidos (SCHILLEREFF, 2015).

Então nota-se que as técnicas ópticas e acústicas tentam conciliar leituras precisas de CSS na presença de tamanhos variáveis de partícula e nem sempre alcançam os valores verídicos. Por isso, cada tentativa de contabilizar os movimentos internos de material suspenso, bem como fluxos de subsuperfície calmos ou turbulentos, pode impedir que certos sensores de CSS operem com capacidade máxima.

Contudo, os dispositivos de CSS são eficazes podendo medir em alta resolução temporal, interações sub-diárias entre eventos hidrometeorológicos, como vento e dinâmica de sólidos suspensos (SS). Eles fornecem informações sobre a relação entre turbidez e CSS, são capazes de detectar partículas floculantes na coluna de água, além de serem apropriados para investigar a influência de eventos de curta duração, como as ondas internas. Também são uma excelente ferramenta, sob estratificação térmica, exceto o turbidímetro óptico, em discernir sua duração, extensão espacial em toda a bacia e o limiar crítico de SS em que são acionados nos lagos (SCHILLEREFF, 2015).

## 2.2.2 Medição de Transporte

Antes de serem depositados nos reservatórios os sedimentos podem ser medidos em transporte, ou seja, a medição da descarga sólida precedente a entrada do rio na represa. Existem métodos que são empregados no contexto brasileiro, que consistem na medição por amostragem *in situ* combinando as medidas de concentração de sedimento, velocidade e vazão do escoamento fluvial. Uma maneira de monitorar os sedimentos em transporte é através das estações sedimentométricas, pois estas são planejadas para estarem integradas com as estações fluviométricas para armazenarem informações.

A frequência das medições pode variar entre diária, semanal, mensal e até mesmo anual, ou acompanhar a variação da descarga sólida, que ocorre principalmente em

eventos chuvosos. Os itens de medição direta (*in situ*) do sedimento em transporte são: a concentração de sedimentos (equipamentos já revisados no tópico anterior), descarga sólida em suspensão, de arrasto (leito) e a total (CARVALHO et al., 2000a). A Figura 4 mostra alguns amostradores utilizados para fazer a medição das descargas sólidas descritas.

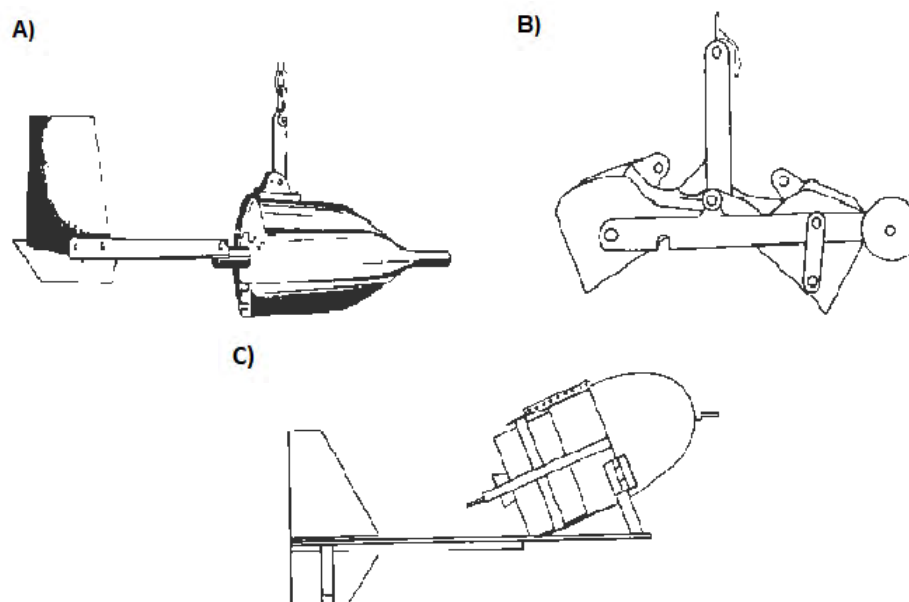


Figura 4 – Equipamentos de medição de sedimento em transporte: A) Garrafa Delft, para medida direta da concentração, B) Amostrador tipo Petersen, para amostragem do material de leito e C) Amostrador de saca compressível, para sedimento em suspensão. Fonte: Carvalho et al. (2000b).

De acordo com Carvalho et al. (2000b), a medição da descarga sólida em suspensão pode ser feita por acumulação do sedimento num medidor de proveta, usando uma garrafa Delft, ou então através de equipamentos de amostragem portáteis fabricados em alumínio, bronze ou aço. Geralmente, esses amostradores são fáceis de operar e podem ser utilizados em toda a seção transversal do rio, através da amostragem por integração na vertical, por igual ao incremento de largura (IIL) ou por igual incremento de descarga (IID). As amostras são de fácil remoção do equipamento e se constituem de uma mistura água-sedimento. Essa aferição pode ser feita também com equipamentos que medem a turbidez ou a concentração, usando o turbidímetro ou o ADCP, diretamente na corrente.

A descarga sólida de arrasto pode ser monitorada por amostradores portáteis de três tipos principais, sendo a amostra coletada em vários pontos da seção transversal - determinados o peso seco, granulometria e calculada a descarga de arrasto. Neste caso, o medidor fica apoiado no leito de 2 minutos a 2 horas de tal forma a receber no receptor de 30 a 50% da sua capacidade. Ainda, podem ser utilizadas estruturas semelhantes à fenda, as quais são abertas no leito do rio por instantes e coletado o sedimento.

Já a medição da descarga sólida total pode ser realizada com o uso de estruturas de blocos, no leito, para provocar turbulência e todo o sedimento ficar em suspensão. Neste caso, faz-se a amostragem do sedimento e calcula-se a descarga em suspensão. Além

disso, um levantamento topo-batimétrico, determinação do volume dos depósitos e a determinação da eficiência de retenção no lago, permitem o cálculo do sedimento total. Entretanto, essas técnicas serão melhor discutidas nos próximos tópicos separadamente.

As amostragens são realizadas de diversas maneiras, como descrevem Carvalho et al. (2000b). Atualmente, a ciência tem avançado e mudanças nessas metodologias ocorreram. Alguns equipamentos no Brasil são de bombeamento com bandeja rotativa, que medem o sedimento em suspensão em ponto fixo e fazem amostragens automáticas em tempos predeterminados. Além disso, existem equipamentos que fazem a medição automática e transmitem os dados do transporte de sedimentos por telemetria, dessa maneira ocorre o monitoramento em tempo real, como no barramento da usina hidrelétrica (UHE) Itaipu. Em âmbito internacional, o monitoramento de transporte também vem ocorrendo com sensores *wireless* automáticos, como os reportados em Watt et al. (2019), Watt (2019).

### 2.2.3 Medição de Sedimentação

Diferentemente das demais técnicas já explicadas, as medições de sedimentação, que avaliam o sedimento que está sendo depositado ou que já se depositou no corpo hídrico, permitem a determinação da taxa de sedimentação nesse ambiente. Entre alguns métodos e equipamentos estão as medições acústicas, amostragem por testemunho de sedimento e ainda as armadilhas de sedimentos.

Todos os métodos citados acima são estimativas que oferecem a espessura da camada do sedimento ou o volume depositado sobre o solo de pré-represamento, exceto a armadilha de sedimento. Com as espessuras e o volume definidos, baseando-se nos anos de operação do reservatório, são obtidas as taxas de sedimentação. Portanto, esses equipamentos trazem uma abordagem que observa o passado do sedimento para fazer a avaliação do mesmo. Por outro lado, as armadilhas de sedimento têm sua taxa de sedimentação pautada em dados recentes, ou seja, o sedimento que ainda está se depositando para a obtenção das taxas.

#### 2.2.3.1 Medições acústicas

Um método que tem uma representatividade significativa para mensurar a mudança de capacidade de armazenamento dos reservatórios é a batimetria (EAKIN, 1939; AGUIAR et al., 2019). Essa metodologia fundamenta-se em uma coleta de pontos de superfície do leito de lagos, com os quais é criado o Modelo Digital de Elevação (MDE), que mostra os vales e elevações do terreno. A coleta de pontos é uma prática usual e ocorre por meio de equipamentos de sondagem acústica.

O equipamento hidroacústico que pode ser utilizado para a batimetria é o sonar multifeixes (*multibeam echo sounder*), que opera emitindo ondas sonoras em forma de leque, podendo ser fixo no casco do barco para o monitoramento. O tempo que levam as ondas para ricochetear no fundo do ambiente aquático é considerado para determinar a

profundidade da água. Com alta resolução vertical, os dados geram um mapa do fundo, o qual pode ser comparado com os mapas do pré-represamento. A partir disso, determina-se o volume de sedimentos depositados e as taxas de sedimentação.

Segundo Minihoni, Brito e Azevedo (2017), é uma prática recomendada e importante para geração de um banco de dados sobre o empreendimento, possibilitando análises comparativas a partir dos diversos levantamentos, resultando em uma análise mais complexa. Contudo, existem algumas desvantagens com o uso dessa técnica, pois os levantamentos batimétricos são propensos às incertezas, umas relacionadas as características do sedimento como o posicionamento e outras com o pós-processamento dos dados. Ainda, reservatórios mais antigos podem ter mapas antigos com pouca precisão ou ainda não possuem essa base de dados.

Além da batimetria, outra medição acústica que pode fornecer a taxa de sedimentação, são aquelas que mensuram a espessura do sedimento submerso, através dos *Sub-Bottom Profilers* (SBP) (WUNDERLICH; WENDT; MÜLLER, 2005; SALEH; RABAH, 2016). Os SBP tradicionais são sonares de frequência única que se propõem a explorar as primeiras camadas de sedimentos abaixo do fundo de ambientes aquáticos atingindo dezenas de metros de profundidade. A estrutura do sedimento é vista através da medição do tempo das reflexões da energia acústica, quando ela encontra diferentes camadas do sedimento.

Os SBP podem constituir sistemas paramétricos hidroacústicos, que são transdutores compactos que exploram o processo de interferência de sinal, para construir um sinal de baixa frequência com a largura de um feixe estreito. Dependem do tipo e ruído do sedimento podendo penetrar até 40 m no sedimento. O sistema possui duas frequências de aquisição de dados, sendo a primeira é uma frequência mais alta cerca de 85 a 115Hz para definir o fundo do reservatório e a outra, uma frequência mais baixa (4-15 Hz) para determinar os perfis do sub-fundo, ou seja, a camada de sedimento depositada pós-represamento. A vantagem dessa técnica de monitoramento é que existe boa penetração com alta resolução e atinge valores precisos da espessura do sedimento. Além disso, com essa determinação, a taxa de sedimentação pode ser calculada com base no material depositado no passado e nos anos de funcionamento da represa (SALEH; RABAH, 2016).

### 2.2.3.2 Amostragem por Testemunho

De acordo com Moreira, Campagnoli e Mazzilli (1999), a deposição e formação de sedimentos em ambientes aquáticos pode revelar informações sobre diferentes fenômenos que ocorreram neste meio e que ficam gravadas ao longo das camadas que o formam. Com isso se torna possível visualizar o passado dos sedimentos e fornecer com alguns métodos analíticos a taxa de sedimentação e datação dos depósitos.

Sabendo disso, o núcleo ou testemunho de sedimentos pode descobrir a espessura do material já depositado em um determinado corpo hídrico, por meio de um dispositivo de amostragem que penetra até o solo de pré-represamento de um reservatório ou lago. O

núcleo de sedimentos pode ser confeccionado com aço inoxidável e tubo de PVC. Ele opera sob a força da gravidade, com o peso do equipamento e ainda pode-se adicionar mais peso para que ele funcione como um martelo e possa penetrar em camadas mais profundas.

Com o afundamento deste dispositivo no corpo d'água, o sedimento fica retido no tubo, e após a coleta é possível observar visualmente as camadas ao longo do seu comprimento e encontrar a espessura total. Com a análise do sedimento amostrado em laboratório, pode-se determinar alguns parâmetros físicos como a densidade e a granulometria diferenciando a amostra com o solo do pré-represamento. Ainda, a taxa pode ser encontrada pela datação dos depósitos através do método de emissão de raios gama de radionuclídeos como o  $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$  (GOYA, 2011).

### 2.2.3.3 Armadilha de Sedimento

Um dos métodos tradicionais de monitoramento de partículas em deposição são as armadilhas de sedimento. Segundo Bloesch e Burns (1980), a sedimentação medida por armadilhas mostrou que esse equipamento é uma ferramenta útil para medir fluxos descendentes, de maneira direta com valores precisos. Autores como Bloesch e Burns (1980), Håkason, Floderus e Wallin (1989), Thomas e Ridd (2004), Schillereff (2015) são alguns que descrevem uma ampla revisão sobre as armadilhas de sedimento.

Schillereff (2015) afirma que são equipamentos simples, construídos por tubos cilíndricos, funil ou em forma de garrafa com um recipiente removível na base, como um amostrador para a coleta do sedimento. Segundo Bloesch e Burns (1980), as configurações da Figura 5, ou seja, no formato cilíndrico, garantem melhor o aprisionamento do sedimento (95 – 100% a real taxa de sedimentação) tanto para fluxos calmos quanto para fluxos turbulentos. Elas são instaladas no corpo hídrico com suas aberturas voltadas para cima em profundidades predefinidas para especificidade de cada estudo, interceptando deste modo as partículas em suspensão que vão se depositando a taxas determinadas pelos seus diâmetros. Conforme a partícula vai entrando na armadilha, as forças horizontais – que são até 10 vezes maiores em corpos hídricos que as forças verticais – diminuem, possibilitando a imersão da partícula na armadilha.

Uma grande vantagem da armadilha é que o material capturado pode ser levado a um laboratório, onde podem estar disponíveis instrumentos com limites de detecção de CSS mais sensíveis. Além disso, outras análises podem ser realizadas como as reportadas em Leite (1998), Storlazzi, Field e Bothner (2011), Bach, Nielsen e Bollwerk (2017). Por outro lado, armadilhas de sedimentos não fornecem informações sobre a relação entre turbidez e concentrações de sedimentos em suspensão.

Algumas relações de tamanho devem ser consideradas na construção de uma armadilha de sedimentos, como, por exemplo, a relação de aspecto (altura/diâmetro) do cilindro. Para evitar sub-amostragem e evitar que a amostra fique anóxica, relações de aspecto de

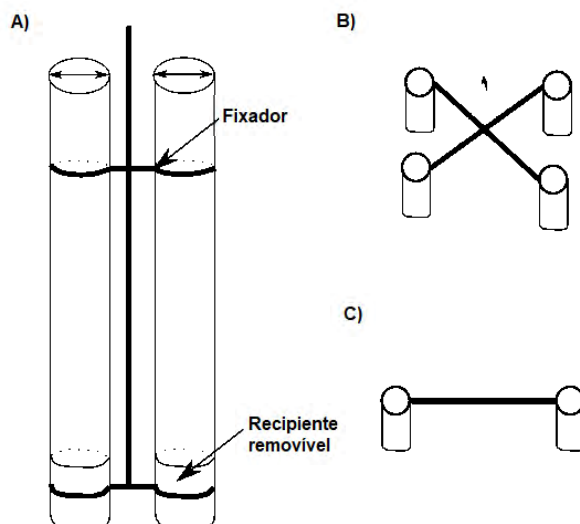


Figura 5 – Ilustrações de algumas armadilhas de sedimento, observar-se: A) o modelo com recipiente removível e os dois tubos paralelos e próximos para haver duplicata da amostra, B) um conjunto de armadilhas úteis para zonas de baixa sedimentação (oceanos) e C) os tubos em paralelo, porém com uma distância maior entre si, adaptado de Schillereff (2015).

15 : 1 e diâmetros inferiores a 40 mm devem ser evitados, respectivamente. Recomenda-se para a amostra não sofrer alterações no recipiente, relações de aspecto de até 5 : 1.

Em relação à estrutura cilíndrica da armadilha, é comumente construído do material policloreto de vinila (PVC) transparentes ou não, ou em vidro plexi. A recomendação é que o recipiente removível seja suficientemente fundo para evitar a ressuspensão do material depositado na armadilha. Para fixação do equipamento no corpo hídrico, é necessária uma boia superior e outra abaixo, o que garante que as armadilhas fiquem na vertical durante as ações de qualquer dinâmica interna dos reservatórios.

Em relação à configuração de instalação na coluna d'água, ela pode ser muito variável de acordo com o objetivo da investigação de cada pesquisa. Se instaladas na superfície as armadilhas, pode-se estudar a pluma de sedimentos que chegam com o rio. Por outro lado, se instaladas no fundo, pode-se observar o material nival (encontrado após o derretimento do gelo de montanha) do lago no Ártico, por exemplo (SCHIEFER et al., 2018) ou avaliar o impacto ambiental de metais pesados (BACH; NIELSEN; BOLLWERK, 2017).

A frequência de coletas também está intimamente ligada à especificidade da pesquisa. As coletas podem ser mensais (DEMIR; MAKINECI; KARTALOGLU, 2013), ou para estudos paleontológicos ou regimes hidrológicos nivais podem ser feitas anualmente (SCHIEFER et al., 2018), ou diariamente (DUGAN et al., 2009).

Outras considerações incluem o risco de contaminação por algas, as quais podem crescer nas armadilhas externas ou na corda de ancoragem do equipamento. Os métodos para minimizar o crescimento das algas, com a adição de agentes químicos que preservam o equipamento e a corda, são considerados por Bloesch e Burns (1980), como potencialmente negativos tanto aos efeitos biológicos na água, quanto na amostra de sedimento.



Além das variáveis já explicadas, existem processos que afetam o cálculo do fluxo de sedimentação, mas não há nada o que modificar quanto a eficiência de captura e o modelo da armadilha. Os efeitos que causam essa perturbação na quantificação do fluxo são a ressuspensão dos sedimentos do fundo da represa que aumentam desta forma a captura dos mesmos – existem algumas equações para correção das mesmas em (BLOESCH; BURNS, 1980)– e a mineralização artificial dentro da armadilha que diminui a captura devido à perda de matéria orgânica. A ressuspensão do material também ocorre, nas amostras de superfície, devido às condições meteorológicas e ventos na interface da água. Quanto à mineralização das amostras não existem alternativas para solucionar, mas considera-se que quanto menor o tempo entre as coletas e menor o tempo de exposição das amostras, menos elas mineralizam. O cálculo das taxas de sedimentação com o uso deste equipamento, utiliza o peso do sedimento seco da amostra pelo intervalo de tempo da amostragem, como

$$S_s = \frac{W}{tA} = \frac{W}{t\pi r^2}, \quad (2.1)$$

onde  $W$  é o peso da amostra de sedimento,  $t$  é o tempo de duração entre uma coleta e outra,  $A$  é a área transversal do tubo cilíndrico e  $r$  é o raio do tubo em ( $S_s$ ;  $g \cdot m^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) (SCHILLEREFF, 2015).

Existem também armadilhas controladas por computador, as quais oferecem resolução temporal aumentada devido à vários frascos alojados dentro de um carrossel interno, girando sob o tubo cilíndrico em intervalos pré-programados (MUZZI; EADIE, 2002).

Por fim, não há uma convicção entre os autores sobre as melhores configurações de construção e instalação das armadilhas. O tamanho pode variar para fluxos turbulentos e calmos, atentando apenas para que o tamanho da armadilha seja suficiente para que não haja subamostragem e não crie condições anóxicas dentro do recipiente do equipamento. A quantidade depende de cada pesquisa e área de estudo. A altura de instalação também é variável conforme o que se deseja analisar, podendo detectar diferenças no regime de sedimentos sob estratificação térmica ou evidências de que ocorreu uma corrente de turbidez (BLOESCH; BURNS, 1980; HÂKASON; FLODERUS; WALLIN, 1989; THOMAS; RIDD, 2004; SCHILLEREFF, 2015).

## 2.3 Eficiência de Retenção de Sedimento

Devido à importância e aos múltiplos usos dos reservatórios, é indispensável revisar os métodos de análise já empregados para a quantificação do assoreamento em reservatórios. Esse conhecimento permite que medidas efetivas possam ser tomadas contra sedimentação, escassez de água, a erosão de margem e na bacia, entre outras. Além disso, uma das maneiras utilizadas na literatura para se quantificar o assoreamento que um reservatório pode suportar, é pela eficiência de retenção (RE) de sedimento. Esse parâmetro pode ser obtido a partir de medições sistemáticas das descargas sólidas afluente e a jusante

da barragem. Com o cálculo desta estimativa, derivaram-se curvas que relacionam o sedimento já depositado, a vazão afluyente e a carga sólida que o corpo hídrico suporta (CARVALHO et al., 2000a).

Para médios e grandes reservatórios utiliza-se a curva de Brune (1953), representada na Figura 6. Este autor foi um dos estudiosos que trouxe um método analítico para sedimentação em reservatórios, que consiste na criação de uma curva que relaciona a eficiência de retenção de sedimentos e a capacidade de afluência (volume total do reservatório pelo deflúvio médio anual). Essa curva pode ser obtida em Carvalho (1994), Vanoni (1977), Morris e Fan (1998) apud Cabral (2005). Esses autores também trouxeram métodos como o de previsão de assoreamento e o método da planimetria das curvas batimétricas.

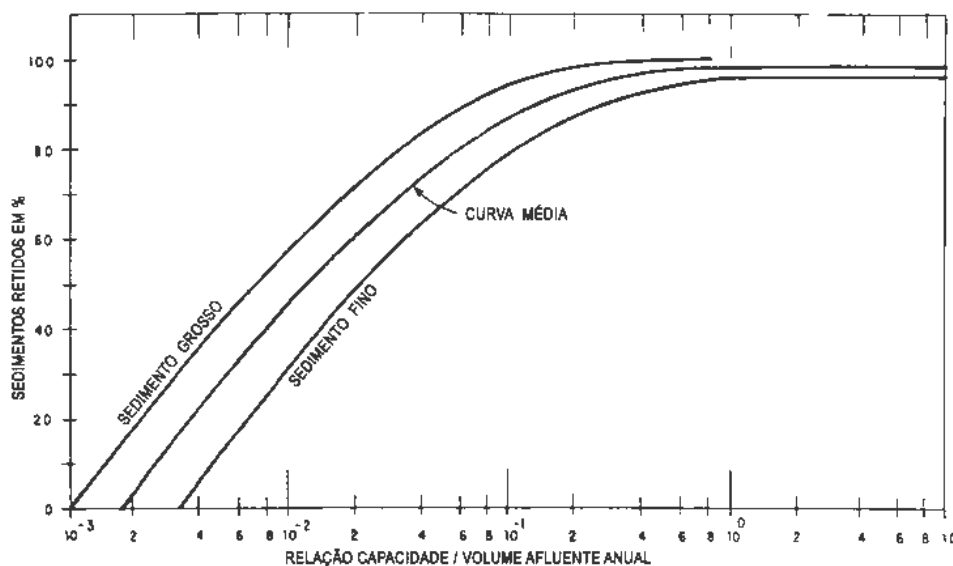


Figura 6 – Curva de eficiência de retenção de sedimento em grandes e médios reservatórios. Fonte: Carvalho et al. (2000a).

Com isso, o cálculo de assoreamento pode ser feito a partir da expressão, apresentada em Carvalho et al. (2000a) como

$$S = \frac{RE \cdot D_{TS}}{\gamma_{ap}}, \quad (2.2)$$

onde,  $S$  é o volume de sedimento retido no reservatório em  $m^3/\text{ano}$ ,  $RE$  é a eficiência de retenção de sedimento no reservatório,  $D_{ST}$  é a descarga sólida total em  $t/\text{ano}$  e  $\gamma_{ap}$  peso específico aparente do sedimento calculado em  $t/m^3$ .

Já para reservatórios pequenos utiliza-se a curva de Churchill, apresentada na Figura 7 e nos trabalhos de Vanoni (1977) e Morris e Fan (1998) apud Cabral (2005). Esta curva utiliza o valor do índice de sedimentação ( $s^2/\text{ft}$ ), o qual relaciona dados hídricos, como o volume do reservatório pela vazão média diária, a vazão média diária pela área da seção transversal média, e esta última pode ser determinada através do volume pelo comprimento do reservatório.

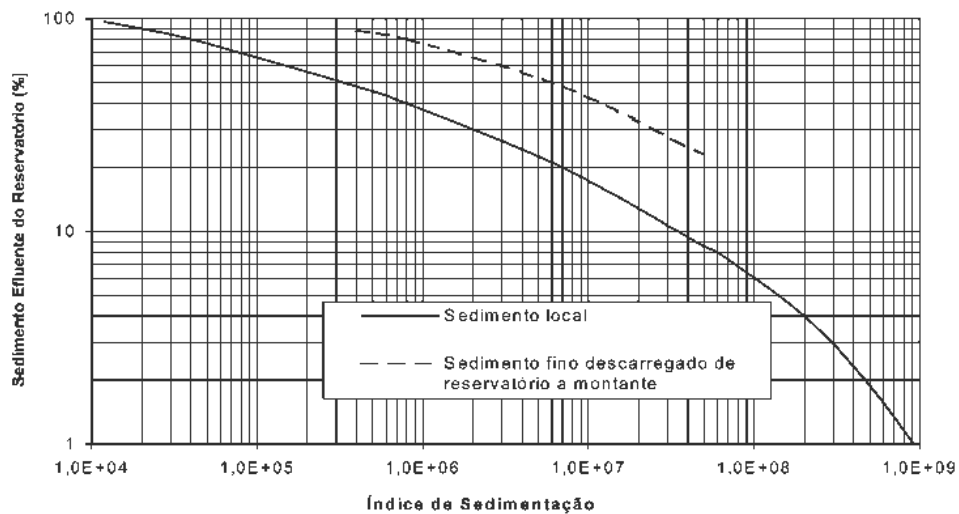


Figura 7 – Curva de eficiência de retenção de sedimento em pequenos reservatórios. Fonte: Carvalho et al. (2000a).

Sabendo que os pequenos reservatórios geralmente operam a fio d'água, utiliza-se o nível dessa operação para o cálculo do índice de sedimentação como apresentado em Carvalho et al. (2000a)

$$IS = \frac{V_{res}^2}{Q^2 \cdot L}, \quad (2.3)$$

onde,  $IS$  é o índice de sedimentação do reservatório,  $V_{res}$  é o volume do reservatório no nível médio de operação,  $Q$  é a vazão afluyente média diária durante o período de estudo e  $L$  o comprimento do reservatório.

### 2.3.1 Descarga Sólida Total

O conhecimento sobre a vazão e transporte de sedimentos em corpos hídricos é essencial para implementação de uma boa gestão em reservatórios. Por essa razão, é fundamental que se estimem a descarga sólida total de sedimentos nesses ambientes aquáticos. Por outro lado, quando essas descargas atingem os lagos e represas acabam favorecendo a formação de correntes de turbidez.

Alves (2008) e Correia et al. (2012) afirmam que essas correntes são transportadas pela turbulência dos fluxos fluviais que entram nos reservatórios, onde primeiramente depositam material mais grosso e depois ocorre a imersão da descarga sólida em suspensão, gerando uma estratificação da coluna d'água devido à diferença de densidade dos sedimentos e do ambiente aquático. Uma corrente de densidade pode acarretar deposição, erosão, ressuspensão de sedimento de fundo e até mesmo uma mistura desta camada com as águas do reservatório ao longo da corrente, que pode se estender até as proximidades da barragem.

Então, de acordo com Sobrinho, Sone e Ayach (2013), as estimativas de descargas sólidas medidas diretamente no local de estudo são de maior confiabilidade. Contudo, por vezes a medição direta não é realizável, por isso existem métodos para estimá-las. Adicionalmente, a utilização do método simplificado de Colby, método indireto, demonstra resultados satisfatórios para corpos hídricos em que não são possíveis medir a descarga sólida de fundo com equipamentos.

O método simplificado desenvolvido por Colby, em 1957, baseou-se no método de Einstein Modificado e em várias medições de campo. Para o cálculo utiliza-se três ábacos e dados de descarga líquida, velocidade média, profundidade média, largura da seção e concentração de sedimentos em suspensão. Essa abordagem é vantajosa quanto à simplicidade de aplicação e à necessidade de poucos dados (BRUNE, 2014). Além disso, é amplamente utilizado em estudos desenvolvidos no Brasil e os dados são de fácil acesso pelo portal da ANA, o HidroWeb (COSTA, 2012).

### 2.3.2 Tempo de Vida Útil do Reservatório

A vida útil de um reservatório é o período em que o corpo hídrico consegue atender ao objetivo para o qual foi construído. Por exemplo, se a represa for construída para o abastecimento público, a vida útil se estende até o momento em que a captação água seja comprometida pelo preenchimento de sedimentos. Então, durante esse período o sedimento depositado não deve afetar o uso primário pretendido do lago artificial. Esse tempo é um importante parâmetro de projeto de represas, que pode afetar a viabilidade econômica e a sustentabilidade dos recursos hídricos (LASHKARIPOUR, 2003).

Um método direto para estimativa da vida útil de um reservatório foi proposto por Gill (1979) que correlaciona a capacidade do reservatório com a idade em anos. O método relaciona taxas de sedimentação, a eficiência de retenção, o peso específico do sedimento depositado, o armazenamento disponível após a sedimentação por um determinado período  $\Delta t$ , podendo ser estimado usando a equação

$$C_o - C = \frac{G \cdot RE \cdot \Delta t}{\gamma}, \quad (2.4)$$

onde,  $C_o$  é a capacidade inicial do reservatório,  $C$  é a capacidade reduzida do reservatório a qualquer momento  $t$ ,  $G$  é o peso característico da entrada anual de sedimentos,  $RE$  a eficiência de retenção de sedimentos,  $\Delta t$  é um curto intervalo de tempo em anos em que a capacidade é reduzida de  $C_o$  para  $C$  e  $\gamma$  é o peso específico do sedimento depositado.

### 2.3.3 Peso Específico Aparente dos Depósitos

A densidade do depósito de sedimento nos corpos hídricos depende da quantidade de espaços vazios ocupados pela água, o que é influenciado pelo tamanho do grão, distribuição granulométrica e pela consolidação sofrida pelo sedimento, que apresenta relação direta

com o tipo de operação do reservatório (KOELZER; LARA, 1958 apud MAIA, 2006). Além desses, outros fatores relevantes que definem o peso específico do depósito são: a textura do sedimento, a taxa de compactação, a idade do depósito, o acúmulo de matéria orgânica e ainda outros fatores de menor importância, como densidade de correntes de sedimento, o efeito da vegetação na área das cabeceiras, entre outros (CARVALHO et al., 2000a).

O deflúvio sólido é geralmente calculado como peso por tempo (t/ano), devendo ser transformado em volume equivalente, como m<sup>3</sup>/ano, por meio do conhecimento do peso específico aparente. Com esses dois parâmetros pode se estimar a vida útil do reservatório (CARVALHO et al., 2000a). Sabendo que os coeficientes das parcelas, são determinados pela função que o reservatório exerce, o cálculo do peso específico aparente é expressado por

$$\gamma_i = W_c \cdot P_c + W_m \cdot P_m + W_s \cdot P_s, \quad (2.5)$$

$$\gamma_t = \gamma_i + K \cdot \log T, \quad (2.6)$$

ou

$$\gamma_t = \gamma_i + 0,4343 \cdot K \left[ \frac{T}{T-1} (\ln T) - 1 \right] \cdot \log T, \quad (2.7)$$

$$K = K_c \cdot P_c + K_m \cdot P_m + K_s \cdot P_s, \quad (2.8)$$

onde,  $\gamma_i$  peso específico aparente inicial (t/m<sup>3</sup>),  $W_c$ ,  $W_m$  e  $W_s$  são os coeficientes de compactação de argila, silte e areia, respectivamente, obtidos conforme a operação do reservatório,  $P_c$ ,  $P_m$  e  $P_s$  as frações de quantidades de argila, silte e areia contidas no sedimento afluyente,  $\gamma_t$  o peso específico aparente médio em  $T$  anos (t/m<sup>3</sup>),  $T$  o tempo de compactação do sedimento depositado (anos) e, por fim,  $K$  a constante que depende da granulometria do sedimento obtida com base no funcionamento da represa.

## 2.4 Nutrientes nos Sedimentos de Reservatórios

Os principais nutrientes responsáveis pela estabilidade da fauna e flora aquática são o fósforo e nitrogênio, pois são abundantes na natureza. Além disso, em virtude das atuais atividades antrópicas, com a introdução de fertilizantes na agricultura, a produção de esgoto urbano e industrial sem o devido tratamento, tem aumentado a disponibilidade destes elementos nos reservatórios (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Os sedimentos são uma importante fonte de nutrientes para os ecossistemas de água doce. Ainda, em alguns lagos, a liberação de nutrientes pelos sedimentos pode representar um processo ecologicamente mais importante do que os insumos de fontes externas de nutrientes. A liberação de fósforo (P) e nitrogênio (N) de sedimentos para os lagos vêm sendo examinada por décadas (MORTIMER; NÜRNBERG; GARDNER et al., 1941, 1988, 2001 apud NOWLIN; EVARTS; VANNI, 2005).

Nowlin, Evarts e Vanni (2005) sugerem que os reservatórios são ambientes ideais para o estudo de fatores que afetam a liberação de nutrientes dos sedimentos, devido ao forte gradiente longitudinal das condições físicas e químicas. Os autores afirmam que um desses fatores é a estratificação térmica longitudinal, a qual altera a concentração de oxigênio dissolvido (OD) em águas acima dos sedimentos, interferindo diretamente nas taxas de liberação de nutrientes. Além disso, eles afirmam que a composição do sedimento, também varia ao longo do eixo longitudinal, com depósitos próximos a entrada contendo uma proporção maior de material alóctone (externo) e os próximos à barragem contendo uma proporção maior de material autóctone (interno).

Analisando a liberação desses componentes separadamente, Nowlin, Evarts e Vanni (2005) afirmam que a maior porção biodisponível de P é liberado pelos sedimentos. Os autores citam alguns processos para a liberação de P na coluna d'água dos sedimentos subjacentes, como, por exemplo, a dessorção e dissolução de P ligado aos precipitados e material inorgânico, mineralização microbiana da matéria orgânica e a difusão de P dissolvido das águas dos poros dos sedimentos. As variáveis ambientais que também regulam a taxa de liberação de P dissolvido (principalmente como fosfato) são a temperatura, concentração de OD, pH e potencial redox.

Além disso, existe o processo pelo qual o P acumulado no sedimento ao longo dos anos retorna à coluna d'água. Uma vez incorporado ao depósito, o P pode continuar sendo liberado por décadas após cessado o aporte externo. Essa liberação depende das variáveis ambientais e fatores tais como ressuspensão física do sedimento por vento ou bioturbação, cobertura vegetal e razão P:Fe (ferro). Nestes casos, o fósforo deixa de ser um nutriente importante para o ecossistema aquático e se tornar um poluente que compromete a qualidade da água ao longo do tempo, pois ocasiona problemas como a eutrofização nos ambientes lênticos (SILVA et al., 2010).

A eutrofização consiste no enriquecimento de corpos d'água por nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, resultando no aumento da produção primária, podendo estar associada a florações de cianobactérias. A alta densidade algal traz consequências severas para a qualidade da água, tais como aumento da turbidez, depleção de oxigênio, mortandade de peixes, entre outros (SMITH; SCHINDLER, 2009). Carpenter (2008) afirma que o fósforo possui um papel especialmente importante na questão da eutrofização, por que, geralmente, ele é fator limitante para a produção primária em corpos d'águas continentais. Entretanto, o nutriente mais limitante na produção primária pode variar para cada corpo hídrico (BEZERRA et al., 2017).

Por outro lado, a dinâmica do nitrogênio é difícil de ser prevista no sedimento, muito embora em média 85% do processo de desnitrificação são oriundos do sedimento, além de atuarem armazenando o nitrogênio na coluna d'água sob condições anaeróbicas. Essa dificuldade ocorre devido à influência das cargas negativas sobre os íons nitrogênio (SILVA et al., 2010). A biodisponibilidade do nitrogênio nos sedimentos ocorre por meio dos

processos de produção do nitrogênio amoniacal, gerado como resultado da mineralização do material orgânico e oxidação deste último em nitrito/nitrato, em condições aeróbias (JAMES et al., 2011). Além desses processos de transformação do nitrogênio, as condições ambientais também favorecem a biodisponibilidade de N, como a profundidade do local, temperatura, estrutura de condensação dos sedimentos, teor de matéria orgânica, bem como a abundância de bactérias e concentrações de nitrato na coluna d'água (RICH et al., 2008; HAN et al., 2014).

## 2.5 Avaliação do sedimento no Reservatório Passaúna

Sauniti, Fernandes e Bittecourt (2004) foram autores que estudaram e caracterizaram o assoreamento no reservatório Passaúna do período da sua construção e enchimento até 2002, ou seja, dos anos de 1990 até o 2002. O método empregado consistiu em utilizar o sonar de varredura lateral. Com isso, foram geradas imagens do fundo do reservatório que possibilitaram a identificação de áreas para coletar amostras de sedimentos do fundo com auxílio de testemunhos verticais. Desta forma, o material coletado foi analisado quanto à sua granulometria e sua estrutura sedimentar. Os resultados mostraram a espessura do material pós-enchimento e trechos do antigo canal do rio Passaúna assoreados, as taxas de assoreamento de 0,66 a 3,04 cm . ano<sup>-1</sup>.

Grande parte desse material sedimentado, vem de áreas do entorno dos afluentes, com contribuições da agricultura e urbanização como ocupação do solo, também das margens do reservatório pela própria erosão hídrica. Sauniti, Fernandes e Bittecourt (2004) afirmam ainda, que devido ao crescimento e desenvolvimento da região metropolitana de Curitiba (RMC), mais atividades industriais e urbanização na bacia hidrográfica do rio Passaúna podem agravar e acelerar o processo de assoreamento.

De acordo com ANA (2019), os órgãos responsáveis e gestores das águas do estado do Paraná são a Secretaria do Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo e o Instituto Água e Terra (IAT). Entretanto, é a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que é responsável pelo gerenciamento das águas do reservatório Passaúna, bem como, do seu tratamento para o abastecimento da população da RMC.

Nesse sentido, conforme Sauniti, Fernandes e Bittecourt (2004), a SANEPAR tem aumentado o tempo de residência nas estações de tratamento de água (ETA), bem como aumentado a adição de químicos, para manter o padrão exigido para abastecimento. Isso é devido ao assoreamento do reservatório Passaúna, processo que facilita a proliferação de algas, demandando maiores esforços no tratamento da água. Sabendo disso, continuar o monitoramento do sedimento no reservatório é de extrema importância. Uma vez que, os sedimentos são um dos maiores poluidores de água. Além do mais, podem funcionar como catalisadores e agentes fixadores para outros agentes poluidores (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004).

Já Hilgert, Sotiri e Fuchs (2019), desenvolveram um método aplicado no reservatório Passaúna para avaliar a magnitude do volume do material sólido depositado e suas características físicas (granulometria, conteúdo orgânico e densidade do solo úmido). Os autores combinaram uma abordagem para a classificação dos sedimentos com a coleta de amostras, equipamentos hidroacústicos e medidas reológicas usando o GraviProbe (GP), que consiste em um penetrômetro portátil de queda livre. Afirmam ainda que a metodologia desenvolvida produziu informações essenciais para o gerenciamento de reservatórios, incluindo o planejamento de medidas como dragagem ou uma avaliação ao longo da vida do volume utilizável do reservatório.

A composição do sedimento encontrada por Hilgert, Sotiri e Fuchs (2019), foi uma média percentual de 17% de teor de matéria orgânica. A densidade aparente úmida nas amostras dos núcleos de sedimento resultou em um valor médio de 1,15 g/cm<sup>3</sup>. Quanto à granulometria, as partículas de sedimentos menores que 63  $\mu$ m ocupam em média 89,8% do reservatório.

Ainda Sotiri, Hilgert e Fuchs (2019), sugerem que o volume depositado desde o barramento do rio, é na faixa de 3,7 hm<sup>3</sup>. Segundo essa avaliação o material sedimentado consiste predominantemente de argila e silte com partes arenosas, principalmente perto das margens e em áreas com alta velocidade de fluxo.

Assim sendo, frente a esse dados já levantados é importante incorporá-los nos resultados que serão apresentados nesta dissertação, a fim de elaborar um planejamento sustentável, visando a tomada de decisões para o gerenciamento desse reservatório.



## 3 Materiais e Métodos

*“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”*

M. Curie (1921)

Este capítulo engloba a metodologia adotada para atingir os objetivos dessa dissertação. Nele está inserida a descrição da área de estudo, a caracterização física e morfométrica, bem como o uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da represa. Sendo todas essas informações essenciais para uma melhor compreensão dos resultados, visto que todos esses fatores influenciam de alguma maneira o processo de assoreamento.

É apresentado em detalhes a metodologia de monitoramento empregada para medir a taxa de sedimentação no reservatório, com a explicação do equipamento utilizado (as armadilhas de sedimento), as estratégias de monitoramento aplicadas em campo (instalação, configurações na coluna d'água, frequência e locais de coleta), as condicionantes meteorológicas dos períodos das coletas e os procedimentos laboratoriais para secagem e análise dos nutrientes do sedimento (fósforo total, nitrogênio total e matéria orgânica).

O cálculo da taxa de sedimentação geral, foi retratado por dois métodos distintos, sendo um pela média aritmética dos resultados das armadilhas e o outro pela média ponderada das áreas predefinidas no reservatório. Com essas taxas, mostrou-se o cálculo usado para estimar a vida útil do reservatório. Além disso, foi exposto o cálculo das taxas de sedimentação dos nutrientes. O capítulo foi concluído com uma breve introdução da utilização do método indireto de eficiência de retenção de sedimentos, o método de Brune, para comparar o tempo de vida útil do reservatório com o resultado das armadilhas.

### 3.1 Área de Estudo

#### 3.1.1 Localização

O reservatório Passaúna possui como principal afluente o rio Passaúna com vazão média de aproximadamente  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , localizado na sub-bacia de mesmo nome, entre as sub-bacias dos rios Verde e Barigui, os quais pertencem à bacia hidrográfica do Alto Iguaçu. A área de estudo está localizada entre os paralelos  $25^{\circ}15'$  e  $25^{\circ}35'$  Sul e  $49^{\circ}25'$  e  $49^{\circ}20'$  a Oeste de Greenwich e a oeste da região metropolitana de Curitiba. A represa envolve os municípios de Araucária, Campo Largo e Curitiba, como observado na Figura 8 (GODOY, 2017; CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016; MEGER, 2007; SMAHA; GOBBI, 2003).

De acordo com Meger (2007) e Godoy (2017), os municípios que compõe a bacia hidrográfica do Passaúna possuem mais de 2 milhões de habitantes, tendo só a cidade de Curitiba 1.917.185 habitantes (população estimada de 2018 pelo censo do IBGE (2019) cidades). É evidente que o aumento populacional com passar dos anos, vai exigir maior demanda por água tratada, por isso é de extrema importância a implementação do monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos nessa região.

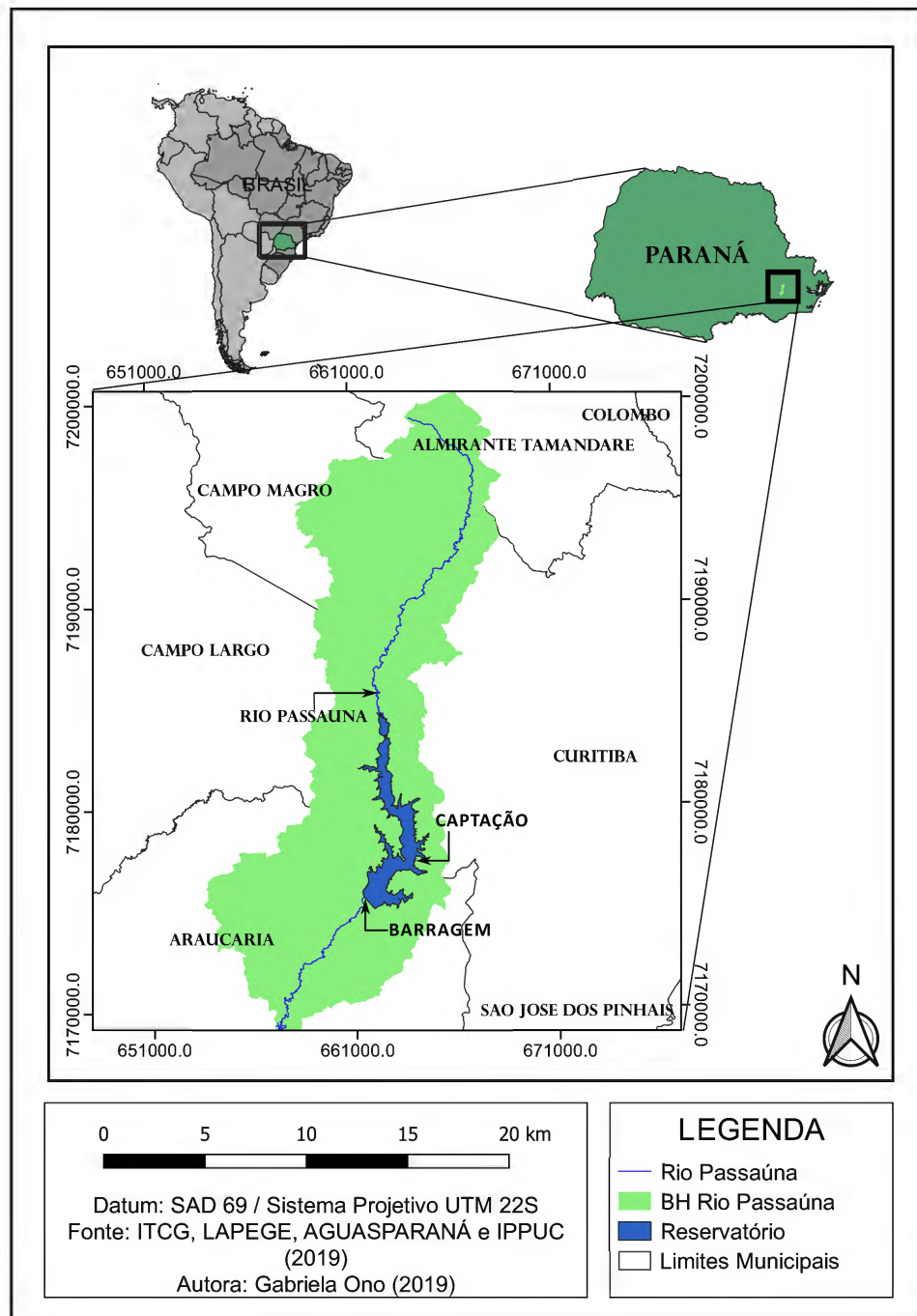


Figura 8 – Localização da área de estudo.

A represa também está inserida na APA (Área de Proteção Ambiental) do Passaúna,

com cerca de 16.000 ha, criada com o intuito principal de controlar o uso do solo e de proteger a qualidade da água para fins de abastecimento, pelo Decreto Estadual nº 458, de 5 de junho de 1991 (GODOY, 2017; CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016; MEGER, 2007; SMAHA; GOBBI, 2003).

### 3.1.2 Caracterização Física

O rio Passaúna foi represado em 1990 com o objetivo de implementar o sistema público de abastecimento de água para a RMC. A construção da barragem iniciou-se em 1985 e somente finalizada em 1989 (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004). De acordo com Wagner (2020), antes do rio entrar no corpo principal, ele deságua em pequena (1000m × 350m) e rasa ( $\approx 0,5$ m) área alagada. Essa área é denominada *buffer* e se conecta a outra parte da represa no local oposto ao fluxo de entrada por uma constrição de cerca de 20 m, seguida por uma curva em forma de S. A partir desse ponto, o reservatório se torna gradualmente mais fundo antes de atingir sua maior profundidade logo antes da barragem.

O reservatório está a aproximadamente 887,2 m de altitude em relação ao nível do mar, possui profundidade média de 8,3 m e a máxima de 17,5 m. Sua área de abrangência é de 8,4 km<sup>2</sup> com o eixo longitudinal de aproximadamente 10 km e apenas 1 km de largura, sendo o volume de água cerca de 59 hm<sup>3</sup> e o tempo de residência de 292 dias, de acordo com Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) e dados cadastrais do reservatório da Sanepar. Segundo o IAP (2017), a represa é responsável pelo abastecimento de cerca de 518.400 habitantes, com vazão de 2,0 m<sup>3</sup>/s. O ponto de captação de água está localizado no lado leste, a cerca de 3 km da barragem e 7 km da entrada.

A bacia hidrográfica do rio Passaúna tem área aproximada de 155,6 km<sup>2</sup>, recebendo contribuições ao longo dos seus 47,2 km, de pequenos cursos d'água das sub-bacias Custódio, Cachoeira, Cachoeirinha, Ferraria, Margem direita A e Norte (MEGER, 2007). Então desde o represamento, com todas essas contribuições, o material de toda a bacia começou a ser retido no reservatório, iniciando o assoreamento do mesmo (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004). O rio Ferraria a noroeste, com cerca de um quinto da descarga do rio Passaúna, possui córregos urbanos sem tratamento adicional e geralmente mostram concentrações elevadas de nutrientes e metais pesados. Admite-se que apenas uma parte do esgoto doméstico da bacia é coletada e transferida para uma estação de tratamento de águas residuais (WAGNER, 2020).

Quanto à geomorfologia da área, apresenta heterogeneidade, relevo ondulado e formado por morros, colinas altimetricamente variando de 850 a 950 m (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004). É dominada pela Formação Guabirotuba, que pertence à bacia sedimentar de Curitiba. Depósitos aluviais em torno dos rios são comuns. Rochas de geologia de base cristalina também são observadas nas partes mais altas da bacia, assim como o Grupo Açungui. É composto por rochas metamórficas e ígneas do embasamento

Tabela 2 – Resumo das informações do reservatório, baseados em Godoy (2017), Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) e dados não publicados pela Sanepar.

Parâmetro	Valores
<b>Dimensões</b>	
Profundidade máxima da água (m)	17,5
Profundidade média da água (m)	8,3
Volume de armazenamento ( $hm^3$ )	59
Tempo de residência (dias)	292
Eixo longitudinal (km)	10
<b>Morfometria</b>	
Área total da bacia ( $km^2$ )	155,6
Área do reservatório ( $km^2$ )	8,4
Altitude (m)	887,2
Dimensões da Barragem (m)	1200 (comprimento) x 10 (largura) x 22 (altura)
<b>Clima</b>	
Zona Climática	Mesotérmico úmido
Temperatura média anual ( $^{\circ}C$ )	17,3
Umidade relativa anual (%)	64

proterozóico, também representado pelo Complexo Atuba (CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016; SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004; MINEROPAR, 2001).

Segundo Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) a composição do solo é muito relevante para o transporte de nutrientes, especialmente em casos de solos com alto teor de argila. A maioria dos solos da bacia são ricos em argila: argissolos, latossolos, entissolos e solos orgânicos.

Segundo a classificação climática de Köppen, o tipo climático dessa área é o Cfb mesotérmico úmido. Esse clima é caracterizado por sempre ser úmido, ou seja, com chuvas bem distribuídas por todas as estações do ano. Também possui a temperatura média do mês mais quente inferior a  $22^{\circ}C$  com verões brandos (amenos) e invernos frios (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004). O resumo das informações do reservatório é mostrado na Tabela 2.

O reservatório Passaúna foi classificado pelo IAP (2017) como moderadamente degradado. Isto implica que ele encontra-se dentro dos limites aceitáveis para ser utilizado como manancial de abastecimento, após tratamento convencional ou avançado. De modo geral, apresenta boa transparência das águas, concentrações baixas a moderadas de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e baixos teores de matéria orgânica. Ainda, apresentou alta alcalinidade total e valores de pH dentro dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA n<sup>o</sup> 357/2005.

O estado de trofia do corpo hídrico, segundo o relatório do IAP (2017), se enquadra como oligotrófico. As características atribuídas são de que o corpo d'água é limpo, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da

Tabela 3 – Médias anuais de Fósforo Total, Nitrogênio Total e DQO, baseados em IAP (2017).

Parâmetro	Posição	2009	2010	2011	2012	2013
Fósforo Total (mg/L)	Superfície	0,010	0,009	0,013	0,012	0,021
	Fundo	0,024	0,013	0,014	0,014	0,015
Nitrogênio Total (mg/L)	Superfície	0,263	0,409	0,386	0,384	0,473
	Fundo	0,724	0,569	0,468	0,502	0,471
DQO (mg/L)	Superfície	9,00	8,65	12,40	8,10	9,70
	Fundo	14,05	6,50	21,50	9,20	9,40

água, decorrentes da presença de nutrientes (ANA, 2019). Os principais índices podem ser observados na Tabela 3. Contudo, principalmente na primavera, são identificados aumentos na densidade de algas, caracterizando florações. Também há presença de cianobactérias, em quantidades que não prejudicam a captação e o tratamento da água para o abastecimento público.

A estratificação térmica ocorre nas regiões mais profundas do reservatório, ocasionando um considerável déficit de oxigênio na coluna d'água superior (epilímnio) e condições anóxicas nas zonas mais profundas (hipolímnio) durante períodos quentes, que é o período compreendido entre setembro a março. Ocorre também um acúmulo de nutrientes e matéria orgânica para o reservatório. Dados da Sanepar mostraram uma diminuição progressiva na qualidade da água do reservatório ao longo da última década (CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016).

### 3.1.3 Uso e Ocupação do Solo

A ocupação da área da bacia hidrográfica iniciou-se em 1876, no município de Araucária, a partir da fundação da Colônia Tomás Coelho (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004). Na atualidade, a previsão para 2020, de acordo com SUDERHSA (2002), é de que a densidade populacional seja de 6 hab./ha. O crescimento urbano em torno do reservatório, em conjunto ao desmatamento e ao crescimento da agricultura, devido à nova demanda, estão causando impactos diretos, pela maior produção de sedimentos e pelas cargas difusas devido às atividades antrópicas como, por exemplo, esgotos clandestinos (SAUNITI; FERNANDES; BITTECOURT, 2004).

Dentre algumas das ocupações potencialmente poluidoras da bacia estava o lixão Lamenha Pequena, localizado no município de Almirante Tamandaré. Felizmente, o lixão foi recuperado e hoje está sob forma de aterro controlado. No período de atividade do lixão sem nenhum controle sanitário, as águas que percolavam o substrato, circulavam livremente e descarregavam sua carga iônica no rio Passaúna. A partir da década de 80, foi implementado o sistema de drenagem reduzindo a infiltração e conduzindo as águas diretamente para o Rio (MEGER, 2007).

Além disso, de acordo com IAP (2017) na bacia existem atividades industriais e

agrícolas como o cultivo de batatas com uso intensivo de fertilizantes e de agrotóxicos. Com o ano 2000 como referência, 48% da bacia já era ocupada pela agricultura, 8,6% por áreas urbanas e 43% por diferentes tipos de vegetação (CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016).

A bacia hidrográfica do rio Passaúna, mesmo sendo um local que possui prioridade para preservação devido à APA Estadual do rio Passaúna, vem enfrentado problemas de poluição e ocorrência de ocupações irregulares que acabam por ocasionar uma queda da qualidade ambiental na totalidade da bacia (FILHO, 2010).

## 3.2 Metodologia para Avaliação de Assoreamento

A metodologia aplicada nesta pesquisa para a obtenção da taxa de sedimentação do reservatório Passaúna, foi a medição realizada em campo com armadilhas de sedimentos. Com a finalidade de comparar os resultados dos fluxos de deposição por esse método direto, foi introduzido um indireto para previsão de assoreamento no reservatório, o de Brune, que utiliza dados de medições de descarga sólida, obtida na estação fluviométrica controlada pelo Instituto das Águas do Paraná.

### 3.2.1 Equipamento: *Sediment Trap*

O equipamento utilizado para a determinação do material depositado foi a armadilha de sedimento (*sediment trap*) da UWITEC (2018). Esta empresa de equipamentos de monitoramento aquático desenvolveu o modelo da armadilha com base em estudos anteriores, associando a geometria das armadilhas com sua eficiência e capacidade de obter amostras de sedimentos, proporcionando a menor ressuspensão interna possível.

Este dispositivo consiste em uma estrutura central de policloreto de vinila (PVC), com dois tubos de PVC transparentes, dispostos verticalmente. Contêm duas mangueiras plásticas de extravasamento e dois recipientes de amostras, ambos conectados nas extremidades inferiores dos tubos de PVC transparentes, como apresentado na Figura 9. O projeto com esses dois sistemas independentes é capaz de fornecer amostras duplicadas para o mesmo ponto da localização da armadilha.

O suporte central da estrutura foi desenvolvido com um material (PVC) resistente à pressão, com capacidade de elevação de 4 kg, com um metro de altura. Os tubos verticais têm um diâmetro interno de 86 mm, isso resulta em uma relação de aspecto 11 : 1. Os recipientes amostrais são fáceis de serem trocados e coletados, possuindo cerca de 2L. A Tabela 4 apresenta as dimensões do equipamento.

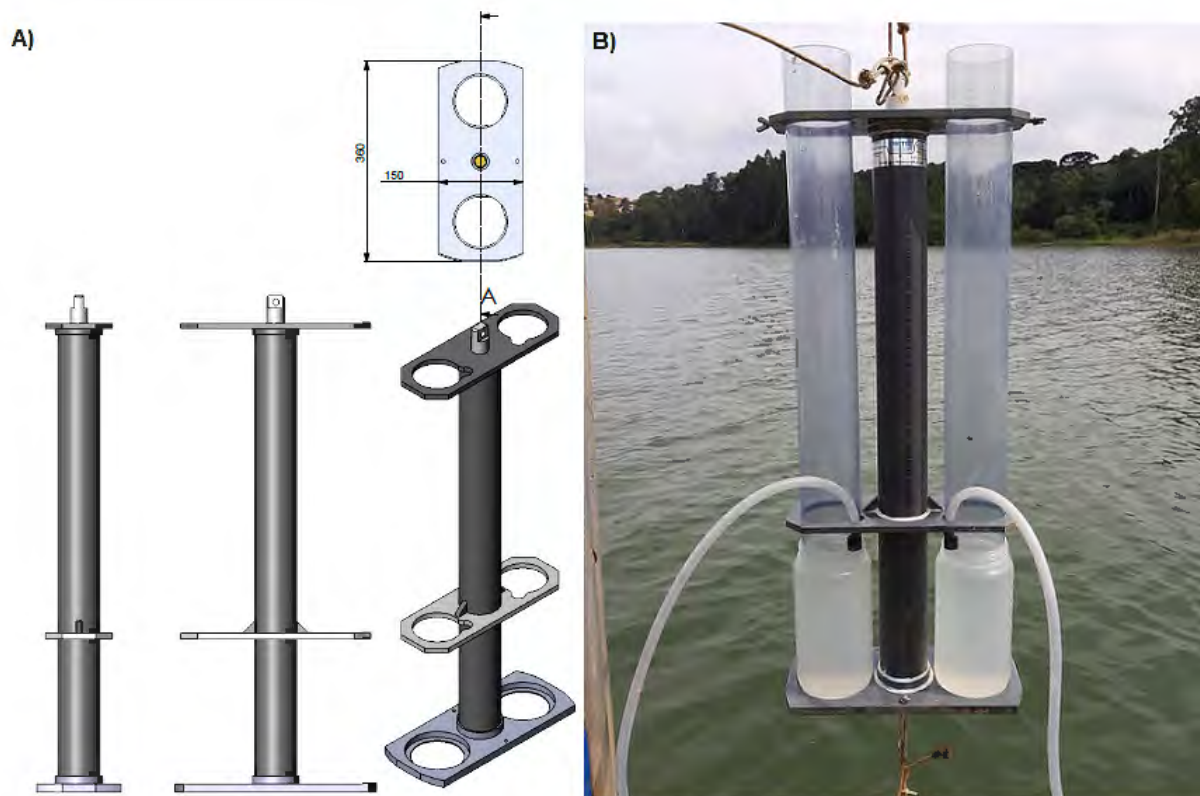


Figura 9 – A) Estrutura central de PVC resistente, onde são acoplados os tubos transparentes, as mangueiras de extravasamento e os amostradores, B) armadilha completa sendo instalada no reservatório, com ajuda do guidaste do barco. Fonte: UWITEC (2018).

Tabela 4 – Dimensões da armadilha de sedimentos. Fonte: UWITEC (2018).

Parâmetro	Dimensões
Capacidade de elevação (kg)	4,0
Diâmetro interno dos tubos (mm)	86
Volume do recipiente amostral (L)	2,0
Altura da estrutura (m)	1,0

### 3.2.1.1 Estratégias de Monitoramento

As estratégias utilizadas para o monitoramento da sedimentação, consistiram na instalação de cinco armadilhas de sedimento na coluna d'água, ao longo do reservatório Passaúna, como visto na Figura 10. Para o ano de 2018 foram instaladas duas armadilhas nas proximidades da barragem da represa (*Dam*), identificadas como DAM S (superfície) e DAM B (fundo), duas na captação de água (*Intake*) feita pela SANEPAR, identificadas como INT S (superfície) e INT B (fundo). A quinta armadilha foi instalada nas proximidades do parque Passaúna (*Park*) identificada com PARK, as coordenadas geográficas dessas armadilhas estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas geográficas e médias das profundidades das armadilhas em 2018 e 2019.

Armadilha	Ano	Posição	Nível (m)	Coordenadas	
				Longitude(S)	Latitude(O)
PPA	2019	Fundo	2,7	49°23'00"	25°27'36"
PARK	2018	Fundo	7,4	49°22'53"	25°29'07"
INT	2018	Superfície	2,0	49°22'13"	25°30'33"
		Fundo	10,5	49°22'11"	25°30'35"
ARM	2019	Fundo	9,4	49°22'52"	25°30'26"
DAM	2018	Superfície	2,0	49°23'08"	25°31'10"
		Fundo	13,0	49°23'14"	25°31'13"

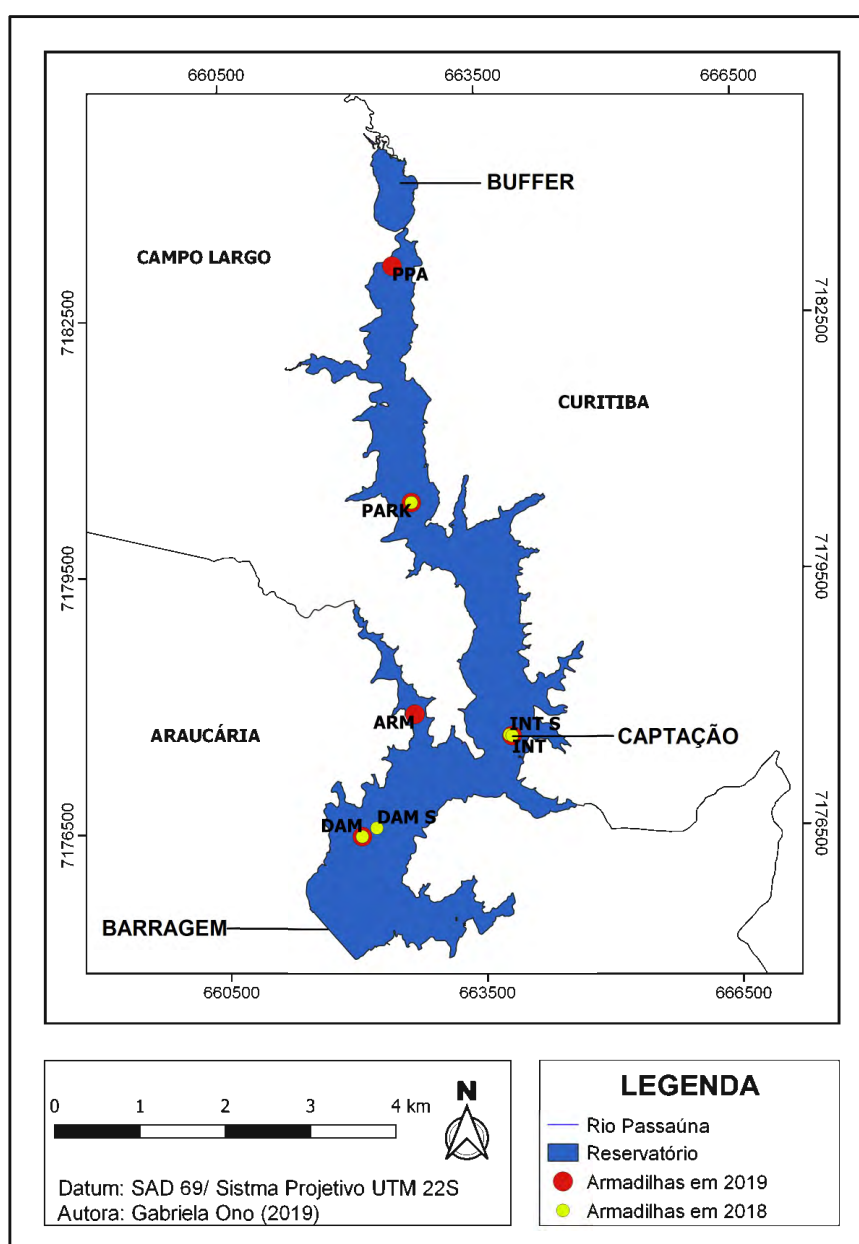


Figura 10 – Localização das armadilhas para o ano de 2018 e 2019.



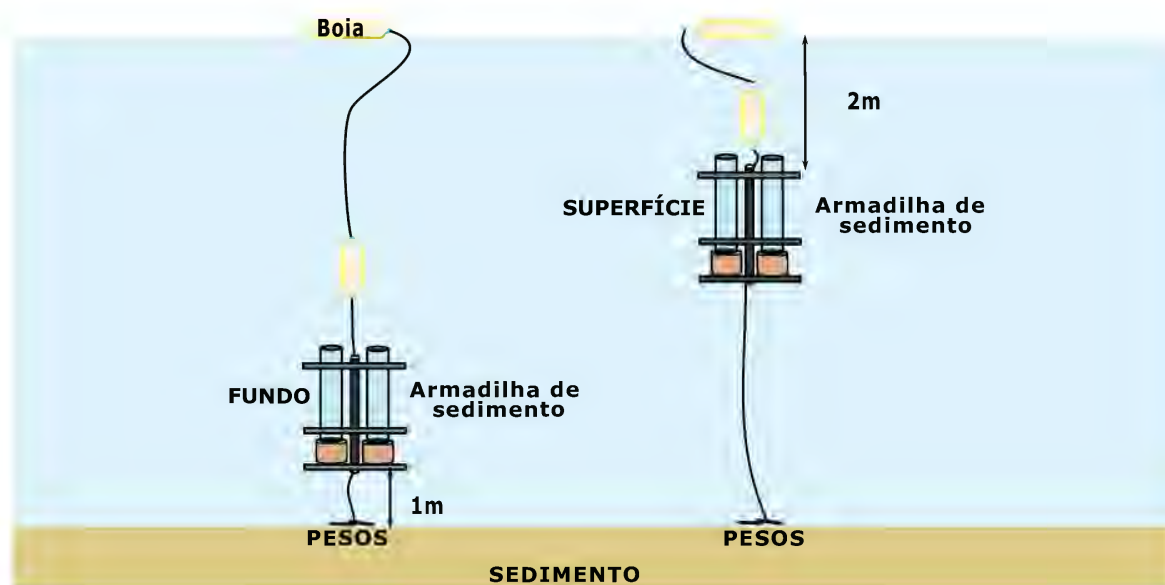


Figura 11 – Ilustração da configuração da armadilha na coluna d'água, uma instalada na posição superfície a 2 metros abaixo do nível do reservatório e a outra armadilha, na posição fundo a 1 metro do sedimento. Em todas as armadilhas houve a adição de boias, tanto para identificação na superfície quanto para mantê-las na vertical na coluna d'água.

As duas armadilhas de sedimentação na posição *Dam* e as duas na posição *Intake* foram instaladas em duas alturas distintas na coluna d'água, uma a dois metros da superfície e a outra a um metro do fundo do reservatório, conforme a Figura 11. A quinta armadilha (na posição, *Park*), foi instalada a um metro do fundo. Para ancoragem e a fixação de todos os equipamentos na represa foram utilizados pesos variados. O nível das armadilhas do fundo mudou devido à irregularidade do reservatório em cada uma das localidades instaladas (Tabela 5).

Outra estratégia empregada para a coleta das amostras foi a colocação de boias na superfície para facilitar a visualização do local dos equipamentos na represa. As boias desempenharam um papel importante oferecendo o empuxo necessário para que as armadilhas se mantivessem na posição vertical, neste caso, foi colocada uma boia entre a da superfície e acima das armadilhas (Figura 11).

A configuração mostrada para as posições *Dam* e *Intake* tinha como finalidade comparar o material sedimentado na superfície e, no fundo, ajudando a entender os processos de produção locais, bem como os de transporte, deposição e ressuspensão de sedimentos. Entretanto, para o ano de 2019, a estratégia de monitoramento foi outra. Durante as campanhas de coleta foi possível concluir, que as armadilhas alocadas próximas à superfície tinham pouca contribuição de massa para os sedimentos. Isto posto, algumas armadilhas foram remanejadas para outros locais no reservatório, como mostra a Figura 10, e todas as armadilhas fixadas a um metro do fundo do reservatório.

As armadilhas da superfície (INT S e DAM S), foram retiradas das suas posições iniciais e instaladas no braço lateral do reservatório (*Arm*), identificada como ARM, e a outra perto da ponte Ferrara onde passa a Rua Eduardo Sprada, identificada como

Tabela 6 – Datas das coletas das amostras.

Coleta	Período	Dias
1	06/04/2018 – 21/05/2018	45
2	21/05/2018 – 25/10/2018	157
3	25/10/2018 – 10/12/2018	46
4	10/12/2018 – 12/02/2019	64
5	12/02/2019 – 25/04/2019	72
6	25/04/2019 – 16/07/2019	82
7	16/07/2019 – 24/09/2019	71
8	24/09/2019 – 14/12/2019	80

PPA. Além disso, essa mudança também foi feita com o intuito de medir a taxa de sedimentação de outras localidades, bem como observar a sedimentação longitudinal, ou seja, a sedimentação do início da entrada do rio até a barragem. Com as novas posições, novas alturas foram encontradas para as armadilhas, vistas na Tabela 5. A profundidade máxima do ponto PPA foi de 3,7 m e está fixa a um metro do fundo, como as outras quatro armadilhas, sendo considerada como, uma instalação do fundo.

As coletas das amostras foram feitas durante o ano de 2018 e 2019 (Tabela 6), realizadas no período diurno entre 10h às 18h, com o tempo em sua maioria nublado e com vento. A periodicidade das coletas foi variável devido aos diversos fatores, um deles as condicionantes meteorológicas. Este fato não é visto como um problema neste estudo, porque as armadilhas de sedimentos são capazes de fornecer uma relação direta de massa por tempo. Os únicos riscos associados à isso são o preenchimento da armadilha com materiais que não são partículas de sedimentos, como peixes ou algas, como mostra a Figura 12, por exemplo, além da mineralização da amostra.

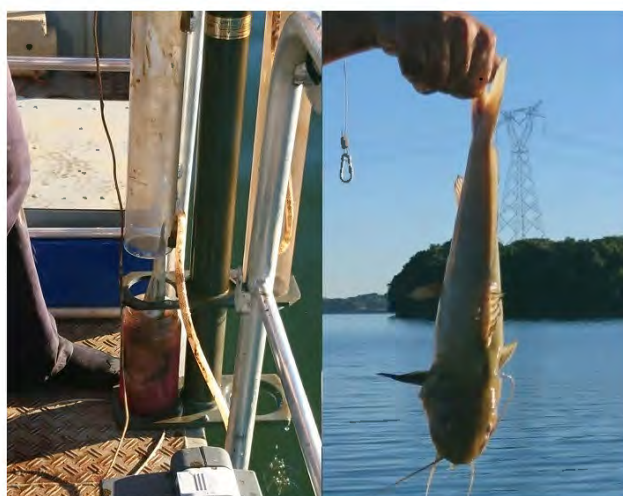


Figura 12 – Invasão do equipamento de fundo na captação, pelo peixe. Esta coleta ficou comprometida e foi descartada.



Figura 13 – Barco com o guindaste utilizado nas campanhas de coleta.

As campanhas de coleta foram feitas com auxílio de um barco fornecido pelo projeto MuDak - WRM, o qual tinha um guindaste que foi usado para retirar os dispositivos da água, como mostra a Figura 13. No momento da coleta, as mangueiras de extravasamento foram utilizadas para a retirada da água dos tubos de PVC. Uma vez que os tubos eram esvaziados, realizou-se a coleta e a troca dos recipientes amostrais.

### 3.2.1.2 Condicionantes Meteorológicas

Considerando a relação positiva de aumento existente entre a precipitação e a vazão de um rio, logo as interferências ao aporte e transporte de sedimentos são percebidas. Para analisar estes possíveis efeitos na área de estudo, foram utilizados dados da estação pluviométrica Barragem Sanepar (2549081) e da estação fluviométrica BR 277 - Campo Largo (65021800), disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (SIH) do Instituto das Águas do Paraná (2020). O gráfico das chuvas acumuladas de cada mês foi produzido juntamente às vazões mensais no período em que ocorreram as campanhas de coleta, como mostra a Figura 14.

Nota-se que nos meses de abril a julho de 2018 choveu menos que o mesmo período do ano seguinte. Além do mais, a precipitação para o ano de 2019 se apresenta mais distribuída ao longo do ano quando comparada com o ano de 2018. Por outro lado, em 2018 as precipitações foram maiores, como pode ser observado nos meses de janeiro, março e outubro de 2018.

Em análise a vazão mensal, houve a resposta esperada, ou seja, as vazões tendem a diminuir com a diminuição das precipitações, exceto as coletas 3 e 5, que mostraram um atraso de resposta ao aumento das chuvas, tendo a queda da vazão. Infelizmente, a base de dados fluviométricos vão até abril do ano de 2019, não sendo possível a análise até o final do monitoramento das armadilhas.

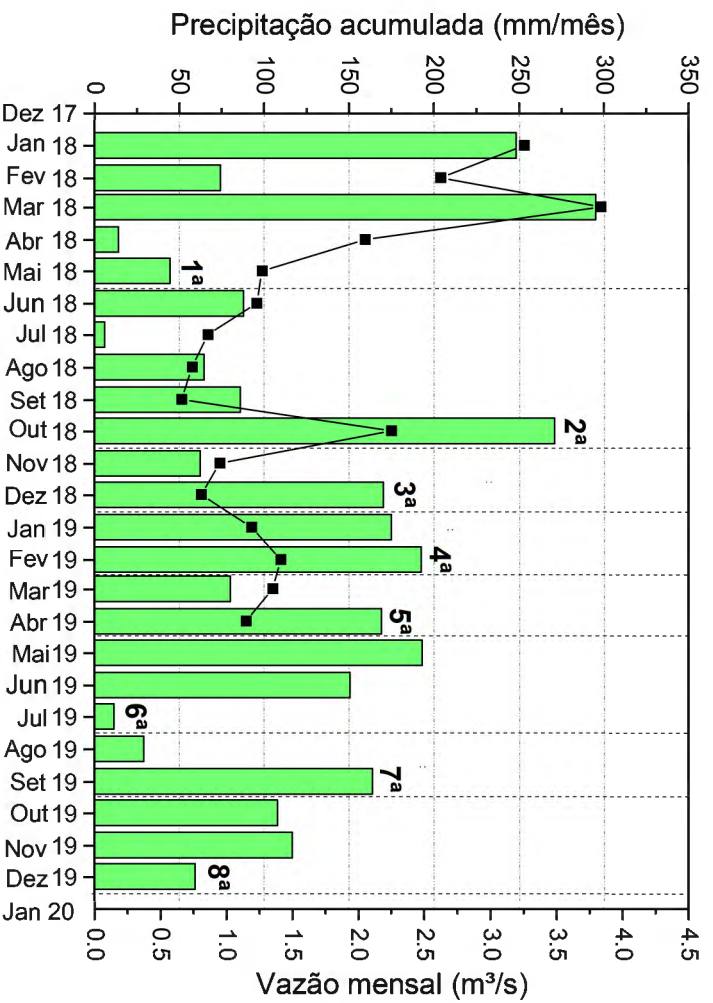


Figura 14 – Precipitação acumulada mensal e vazão mensal do rio Passaúna nos anos de monitoramento. Os números indicam as coletas e o período em que ocorreram.

### 3.2.1.3 Procedimentos Laboratoriais

As principais análises realizadas nas amostras de sedimento foram a quantificação da massa, a determinação do nitrogênio total ( $N_T$ ), fósforo total ( $P_T$ ) e matéria orgânica (MO). Entretanto, não foi possível avaliar todos esses parâmetros em todas as amostras. Exceto a coleta 1, todas as outras amostras foram enviadas aos parceiros do Projeto Mudak para realização desses ensaios na Alemanha. Ainda, algumas das amostras foram analisadas na Alemanha e no Brasil, como as coletas 2 e 3.

Refrigerou-se as amostras coletadas por alguns dias, para que o sedimento ressuspenso, que foi agitado no transporte entre o reservatório e laboratório, localizado na UFPR, decantasse para o fundo do recipiente. Com enfoque na amostra de sedimento apenas, a água da amostra foi descartada no laboratório. Os procedimentos consistiram na drenagem das amostras, depois a inserção do sedimento em tubos *falcon* para centrifugarem e posteriormente secarem em uma estufa de secagem por 2 a 6 dias com uma temperatura média de 60 °C, como mostra a Figura 15.

Após a secagem, todas as amostras foram pesadas e enviadas aos parceiros alemães para a determinação de  $N_T$ ,  $P_T$  e MO. Para as análises de  $P_T$ , foi feita a digestão com HCl, o ajuste de pH, diluições e adicionado ácido ascórbico-molibdato na solução e fez-se leitura em espectro UV-Vis (APRILE; JR, 2003). Para o  $N_T$  empregou-se o método de Kjeldahl (GAIVANI; GAERTNER, 2006) e para a matéria orgânica foi utilizado o método de perda



Figura 15 – Amostras em análise no laboratório da UFPR. A foto à esquerda é uma amostra bruta, com o recipiente cheio de água e sedimento abaixo. O aspecto e coloração do frasco é característico do ponto PARK, de difícil remoção na lavagem após a análise. A foto à direita registra as amostras secas nos tubos falcon após a estufa, prontas para serem desagregadas e pesadas.

de peso por ignição (BRUNETTO et al., 2006). Com a determinação do nitrogênio e fósforo total para algumas amostras, foi analisado a relação N/P, que consiste em uma estimativa preliminar do nutriente limitante no sedimento.

#### 3.2.1.4 Cálculo da Taxa de Sedimentação

Cada armadilha instalada na represa continha dois frascos de amostras de sedimento. Após a secagem das amostras, o valor da massa acumulada por armadilha foi a média das massas secas dos dois frascos. Então, para a determinação da taxa de sedimentação, utilizou-se essa média em g, a área da seção transversal do tubo da armadilha, 0,00581m<sup>2</sup> e o tempo entre cada coleta em dias, conforme a equação 2.1.

Para encontrar uma taxa de sedimentação em cm/ano (altura por tempo), a qual é mais difundida para gestão de recursos hídricos, foram utilizados os dados do núcleo de sedimentos provenientes de outros parceiros do Projeto MuDak (SOTIRI; HILGERT; FUCHS, 2019). Com a metodologia aplicada por esses autores para obtenção da granulometria, cor, estrutura, textura, vazios de gás e fatores de fonte orgânica (raízes e folhas), o material amostrado foi ponderado e a densidade calculada.

Com esses dados foi possível identificar a densidade do sedimento no fundo do reservatório, próximo a localização das armadilhas. A densidade média encontrada e utilizada no cálculo foi 1,15 g/cm<sup>3</sup>. Com o resultado da Equação 2.1 e utilizando a densidade do sedimento, as taxas de sedimentação em cm/ano podem ser calculadas a partir de

$$S_f = \frac{S_a \cdot 365}{d \cdot 10}, \quad (3.1)$$

onde  $S_f$  é taxa final de sedimentação em cm/ano,  $S_a$  é a taxa de sedimentação de cada armadilha em g/m<sup>2</sup>dias e  $d$  é a densidade do sedimento em kg/m<sup>3</sup>.

Após esses passos, foi encontrada uma taxa de sedimentação média para o reservatório Passaúna. Duas metodologias de cálculo foram empregadas, a primeira sendo uma média aritmética da média de sedimentação de cada um dos cinco equipamentos de fundo, e a segunda uma média ponderada, considerando a área de influência de cada armadilha de fundo.

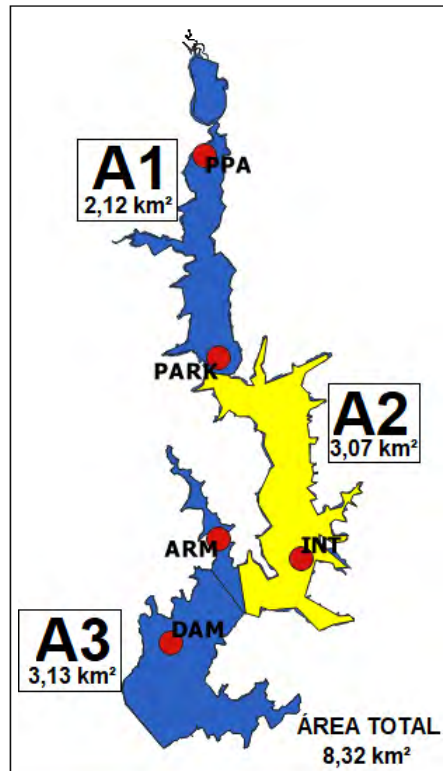


Figura 16 – Áreas para o cálculo da média ponderada, calculadas pelo Qgis. A área A1 inclui a área alagada, entrada do reservatório, até o parque Passaúna, a área A2 (em amarelo) vai do parque até o braço lateral e a área A3 engloba o braço lateral se estendendo até a barragem.

Para a média ponderada o reservatório foi dividido em três áreas (A1, A2 e A3). Cada uma dessas áreas foi estimada através do *Software* Qgis, o qual é um software livre com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG). Com a escolha das áreas, observou-se que as armadilhas PPA e PARK estão na área A1, a armadilha INT B na área A2 e as armadilhas ARM, DAM B na área A3, como apresenta a Figura 16. O cálculo da taxa é dado por

$$S_{Rp} = \frac{(S_1 \times A1) + (S_2 \times A2) + (S_3 \times A3)}{A1 + A2 + A3}, \quad (3.2)$$

onde,  $S_{Rp}$  é a taxa média de sedimentação no reservatório em cm/ano,  $S_1$  é a média das taxas de sedimentação nas armadilha PPA e PAR,  $S_2$  é a média das taxas de sedimentação na armadilha INT B do fundo,  $S_3$  é a média das taxas de sedimentação na armadilha ARM

Tabela 7 – Cota, área e volume do Reservatório. Fonte: MuDak, 2019.

Cota (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Volume (hm <sup>3</sup> )
870,576	0,0	0,0
875,495	1,66	2,60
876,479	2,41	4,63
877,462	2,89	7,24
878,446	3,46	10,35
879,430	3,96	13,96
880,414	4,53	18,15
881,397	4,93	22,79
882,381	5,38	27,83
883,365	5,96	33,39
884,349	6,39	39,45
885,332	6,80	45,90
886,316	7,29	52,81
887,300	8,39	60,24

e DAM B do fundo. Para estas duas análises, foi conveniente a exclusão das amostras de superfície, para uniformizar a taxa média de sedimentação com valores do fundo. Quanto às variáveis  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são as áreas correspondentes na Figura 16 em km<sup>2</sup>. Desta maneira, cada equipamento tem sua influência em determinada área, resultando em uma taxa geral para o reservatório.

De acordo com dados não publicados da Sanepar, a cota mínima de operação é 879,5 m. Para o cálculo do tempo de vida útil do reservatório foram considerados os dados de cota, área e volume estimados por pesquisadores do MuDak, os quais são apresentados na Tabela 7.

Com o fluxo médio de deposição, pôde-se calcular a estimativa do tempo de vida útil deste lago. Segundo Carvalho et al. (2000a), entende-se vida útil de um reservatório de abastecimento o tempo necessário para que o mesmo assoreie até a altura de captação, ou seja, que a altura de sedimento depositado no fundo, alcance a soleira da tomada d'água. O tempo pode ser calculado por

$$S_t = \frac{S_s \cdot 365 \cdot A_c}{10^6}, \quad (3.3)$$

$$T_t = \frac{V_{cap} \cdot d}{S_t \cdot 10^3}, \quad (3.4)$$

onde  $S_t$  é a taxa média de sedimentação em t/ano e a  $S_s$  em g · m<sup>-2</sup>dia<sup>-1</sup>,  $A_c$  a área do reservatório ( $3,96 \times 10^6$  m<sup>2</sup>) na cota mínima de operação, a variável  $T_t$  é o tempo de vida útil do reservatório pelas medições das armadilhas de sedimentos em anos,  $V_{cap}$  o volume na cota da captação ( $13,96 \times 10^6$  m<sup>3</sup>) e  $d$  a densidade média do sedimento em kg/m<sup>3</sup>.

A fim de comparar o tempo de assoreamento obtido por meio das armadilhas com técnicas já empregadas na represa, os diferentes dados sobre os sedimentos do Passaúna

da literatura foram modificados para tempos de vida útil. Assim, o resultado de Sauniti, Fernandes e Bittecourt (2004) foi combinado com a densidade atual do sedimento e estimado o tempo de vida. Para Sotiri, Hilgert e Fuchs (2019), que apresentaram o volume total já depositado de material sólido no reservatório, também foi utilizado os dados de densidade e calculada a taxa de deposição, bem como a vida útil. Além destes, foram utilizados mais dados do Projeto MuDak, ainda não publicados, mas que mostram resultados do tempo de vida e taxas de deposição obtidos com a medição acústica, o penetrômetro de queda livre e o testemunho de sedimento.

Como descrito nos procedimentos laboratoriais, também foram analisadas as frações de fósforo e nitrogênio total. Com a determinação destes compostos, foram estimadas as taxas de sedimentação. Com base na Equação 2.1, as taxas desses compostos foram dadas por

$$P_s = \frac{P \cdot W}{tA} = \frac{P \cdot W}{t\pi r^2}, \quad (3.5)$$

$$N_s = \frac{N \cdot W}{tA} = \frac{N \cdot W}{t\pi r^2}, \quad (3.6)$$

onde  $P_s$  é a taxa de sedimentação de fósforo total em  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ ,  $P$  é o fósforo total em  $\text{mg/g}$ ,  $W$  é o peso da amostra de sedimento em  $\text{g}$ ,  $t$  é o tempo de duração entre uma coleta e outra em dias,  $A$  é a área transversal do tubo cilíndrico em  $\text{m}^2$ ,  $r$  é o raio do tubo da armadilha em  $\text{m}^2$ ,  $N_s$  a taxa de sedimentação de nitrogênio total em  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $N$  é o nitrogênio total em  $\text{mg/g}$ . Além disso, foram realizadas correlações estatísticas entre a profundidade das armadilhas e a massa de acumulação, matéria orgânica, fósforo e nitrogênio total.

### 3.2.2 Método de Brune

Para avaliar o assoreamento e determinar a vida útil do reservatório, de modo completo as armadilhas de sedimento, foi aplicado o método de Brune (1953). Por meio dele, estima-se a porcentagem da eficiência de retenção de sedimentos, baseado-se na quantidade de sedimentos e no volume afluente do reservatório. Contudo, para obter a curva chave de sedimentos e, em seguida, a descarga sólida total no reservatório Passaúna, utilizou também o método simplificado de Colby (1957). O detalhamento dos cálculos e os resultados parciais desses métodos estão descritos no Apêndice A.



## 4 Resultados e Discussão

*“Os estudos de previsão e todo o processo de medições sedimentométricas visam a verificação de assoreamento do reservatório e as necessidades de controle do sedimento com intenções de mitigar os efeitos.”*

N. Carvalho (2000)

A divisão deste capítulo buscou individualizar cada análise, no qual cada parâmetro (massa, fósforo e nitrogênio total) tem sua taxa de sedimentação e a discussão dos resultados. Primeiramente, discutiram-se os resultados das armadilhas determinando as variações espaciais. Depois foram iniciadas as discussões quanto à variação dos fluxos no tempo, além de relacioná-las com as condicionantes meteorológicas, visto que essas podem afetar diretamente os valores da sedimentação. Para concluir essa etapa da análise, foi apresentado o tempo de vida útil e comparações deste valor com o método de Brune e medições realizadas no reservatório por outros pesquisadores.

As análises deste capítulo prosseguiram com os dados de matéria orgânica, cujas porcentagens foram calculadas na amostra de sedimento, apresentada sua variação ao longo do reservatório e as suas correlações com a profundidade. De maneira semelhante, os parâmetros de fósforo e nitrogênio total também foram processados, relacionando as suas variações no tempo e espaço, bem como com a profundidade.

Em suma, os resultados sugerem algumas possíveis ações a serem tomadas, para refinar o gerenciamento desse reservatório de grande importância para região metropolitana de Curitiba. Por isso, foram aludidas as vantagens e desvantagens do uso do equipamento e algumas intervenções que podem servir para os órgãos gestores da represa.

### 4.1 Avaliação da Taxa de Sedimentação

#### 4.1.1 Variação Espacial

Como já apresentado em Materiais e Métodos desta dissertação, cada equipamento foi instalado no lago com distâncias diferentes em relação à entrada do rio Passaúna na represa. Essas distâncias podem ser observadas na Tabela 8, a partir das quais pôde-se observar as variações longitudinais da taxa de sedimentação ao longo do reservatório.

Assim posto, a armadilha mais próxima da entrada do rio na represa foi a PPA, com uma distância de aproximadamente 1,5 km, e as mais distantes, as armadilhas DAM S e DAM B, a aproximadamente 8,6 km. De acordo com essas medidas, todas as amostras de todas as coletas foram analisadas conjuntamente, conforme a Figura 17.

Tabela 8 – Distância longitudinal de cada armadilha em relação a entrada do rio Passaúna no reservatório.

Armadilha	Distância(km)
PPA	1,51
PARK	4,26
ARM	6,66
INT B	7,40
INT S	7,62
DAM B	8,57
DAM S	8,75

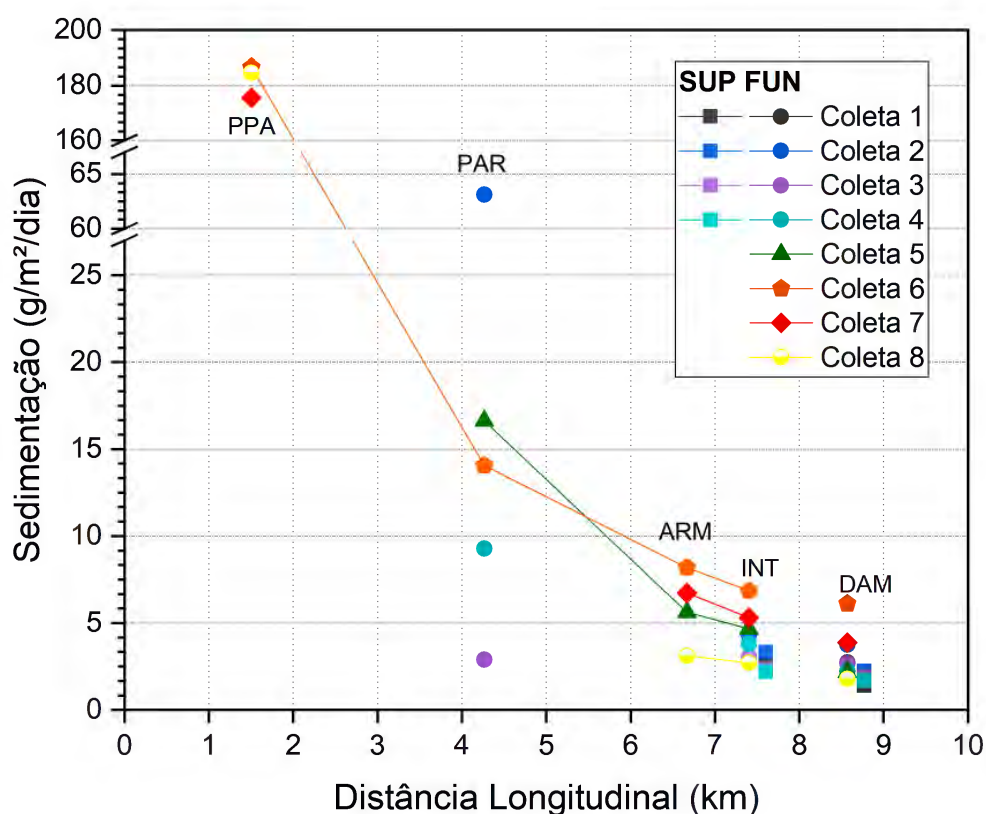


Figura 17 – Variação espacial da taxa de sedimentação da massa acumulada nas armadilhas.

Avaliando a variação espacial da sedimentação, a Figura 17 mostra o decréscimo gradual da taxa em relação ao aumento da distância em que as armadilhas foram instaladas ao longo do lago artificial. As armadilhas mais próximas à entrada do rio Passaúna apresentaram maior aprisionamento do sedimento, resultando em taxas de sedimentação maiores, quando comparadas com as mais distantes.

De maneira geral, as taxas variam de 1,40 a 63,1 g/m<sup>2</sup>/dia para as coletas 1 a 4 (2018) e 1,79 a 186,64 g/m<sup>2</sup>/dia para as coletas 5 a 8 (2019). A armadilha que apresentou as maiores taxas, foi a PPA, com seu maior valor de 186,648 g/m<sup>2</sup>/dia na coleta 6, o qual é aproximadamente 3 vezes maior que a armadilha PARK que apresenta as segundas maiores

taxas.

Nota-se grande variabilidade dos valores da armadilha PARK com taxas de 2,89 a 63,11 g/m<sup>2</sup>dia. Esta armadilha está localizada aproximadamente no meio do reservatório, considerando a distância da entrada do rio no *buffer* até a instalação das armadilhas DAM S e DAM B. Este ponto mostra a dificuldade da medição exata da pluma de sedimentos que passa por esse trecho. Quando compara-se os valores das outras armadilhas, não observa-se essa grande variação no mesmo ponto de coleta. Então os fenômenos de transporte de sedimentos nesse área, precisam ser avaliados com ajuda de outros equipamentos, para verificar qual a sedimentação local.

A armadilha PPA, além das maiores taxas, é também a mais próxima da entrada do rio na represa. Sendo a armadilha DAM S a mais distante e a que apresentou as menores taxas, sendo de 1,40 g/m<sup>2</sup>dia a menor taxa na coleta 1. Por isso, essas evidências mostram que quanto mais próximo da entrada do rio Passaúna, maiores as taxas de sedimentação, as quais diminuem nas proximidades da barragem (ponto mais a jusante do reservatório).

Esses resultados estão em concordância com Thornton, Kimmel e Payne (1990) os quais afirmam que a carga de sedimentos é depositada diferencialmente ao longo do reservatório. Ainda foi observado nas análises laboratoriais, que além da maior quantidade de sedimento, as amostras PPA detinham grãos mais grossos, as armadilhas DAM detinham menos sedimentos e com grãos mais finos. Este fato está de acordo com (SANTOS; CUNHA, 2015), ao sugerirem que as partículas com os menores diâmetros são sedimentadas nas proximidades da barragem, enquanto as maiores são as primeiras a se depositar no início do reservatório.

Na Figura 17, observa-se também que as armadilhas da superfície (INT S e DAM S) apresentaram menores taxas quando comparadas com as que estavam no fundo (INT B e DAM B). De acordo com as estratégias de monitoramento, os resultados das armadilhas de superfície estão disponíveis até a coleta 4. Em relação a esses equipamentos, nota-se que há decaimento da taxa da armadilha INT S para a DAM S, visto que esta última é ainda mais distante e possui os menores índices de sedimentação em todas as quatro coletas.

A diferença da quantidade de material sedimentado nas amostras de superfície pode ser decorrente da dinâmica interna do lago como, por exemplo, as correntes de densidades ou de turbidez, que são a interação de um ou mais fluidos de diferentes densidades. Segundo (BARBOSA, 1999), isso pode ser resultado de fluidos com temperaturas desiguais e concentrações de sedimentos em suspensão ou sólidos dissolvidos distintos. Neto e Araújo (2009) afirmam que correntes de turbidez têm como principal meio de suspensão de sedimentos a turbulência. Essas correntes são geradas por meio de diversos processos naturais como o influxo fluvial no reservatório. Com a entrada do rio sob o leito de grandes declividades, as correntes tendem a aumentar a velocidade devido à auto-ressuspensão dos sedimentos de fundo e a densidade com relação àquela do fluido ambiente.

A ressuspensão de sedimentos, também é um dos fatores que pode aumentar a quantidade de material nas armadilhas de fundo. Este fenômeno pode ser causado pelo movimento oscilatório de ondas geradas por vento, variação térmica ou por correntes de densidades, as quais promovem uma velocidade que se propaga ao longo da coluna d'água até o fundo provocando ressuspensão, devido à tensão de cisalhamento gerada (JIN; JI, 2004). Então, esse processo acaba afetando diretamente o aumento da concentração de sedimentos na coluna d'água. Por outro lado, as condicionantes meteorológicas também podem acarretar na ressuspensão de material das amostras de superfície, assim alterando os fluxos do topo (SCHILLEREFF, 2015).

As alturas encontradas com o Disco de Secchi nas últimas coletas também demonstram maior transparência de jusante a montante. No ponto da Ponte Ferraria (PPA) a profundidade de Secchi foi em média 1,28 m, em contrapartida, no ponto mais a jusante, na armadilha DAM a altura média foi de 3,77 m. Essa menor transparência no começo do reservatório indica maior quantidade de material suspenso e transporte de sedimentos, o qual diminui até a barragem da represa, onde além de maior profundidade, apresenta menor turbidez e material suspenso, comprovado pelas baixas taxas de sedimentação neste local.

Os índices médios de deposição de cada armadilha estão apresentados na Figura 18. Eles foram representados de duas maneiras, a primeira com o dado direto obtido da armadilha em  $\text{g}/\text{m}^2/\text{dia}$  e a segunda, no outro eixo das ordenadas a sedimentação em  $\text{cm}/\text{ano}$ .

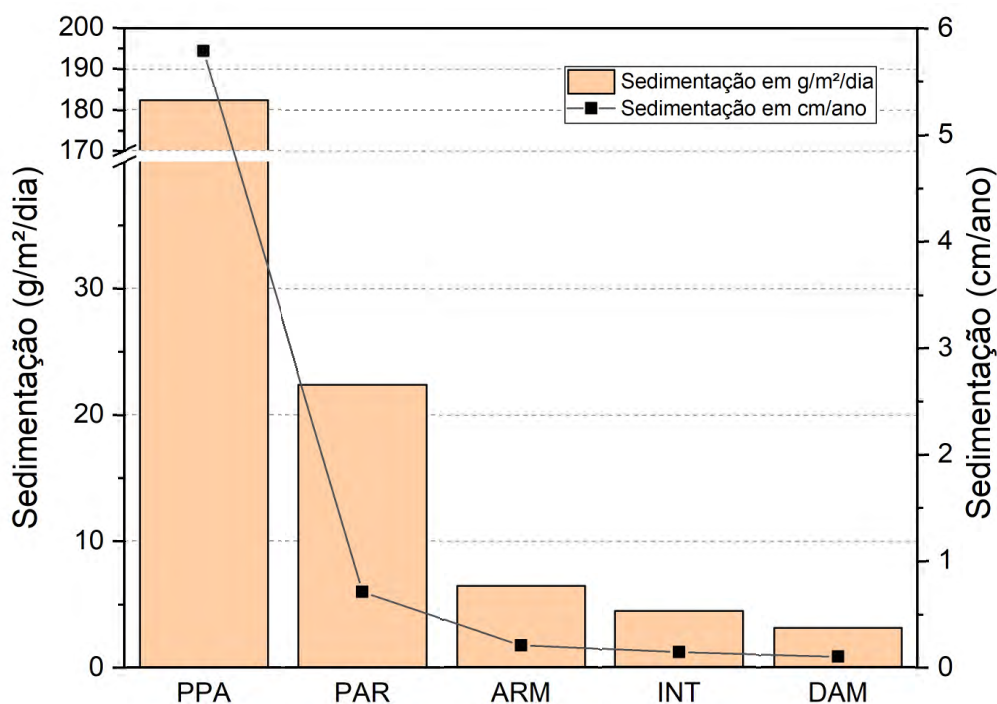


Figura 18 – Taxa de sedimentação por armadilha de sedimento.

Observa-se que a montante do reservatório teria em média 5,80 cm/ano de sedimentação, o que representaria em 30 anos uma altura de 1,74 m. Este resultado, é preocupante pois, indica que algumas medidas de gerenciamento sobre o depósito sedimentar sejam iniciadas, já que neste trecho a altura máxima medida foi de 3,7 m. Já no ponto do parque, com a segunda maior média, foi encontrado o valor médio de 22,36 g/m<sup>2</sup>/dia ou 0,71 cm/ano, 8 vezes menor que o ponto PPA. Então, apesar da alta sedimentação no início do reservatório, as taxas de deposições delta (do meio do reservatório) não chegam nem a 1 cm/ano, variando de 0,09 a 0,7 cm/ano.

#### 4.1.2 Variação Temporal

A sazonalidade exerce influência direta sobre sistemas aquáticos, causando alterações na granulometria e distribuição de sedimentos. A erosão do solo na bacia hidrográfica do Passaúna pode ter algumas variações causadas pelas condições sazonais, como eventos extremos e mudanças no regime de precipitação, implicando em alteração na quantidade de sedimento erodido e transportado para a represa, modificando o fluxo de material aprisionado nos equipamentos utilizados nesta pesquisa. A variação temporal da taxa de sedimentação no reservatório no período em que foi monitorado, pode ser avaliada na Figura 19.

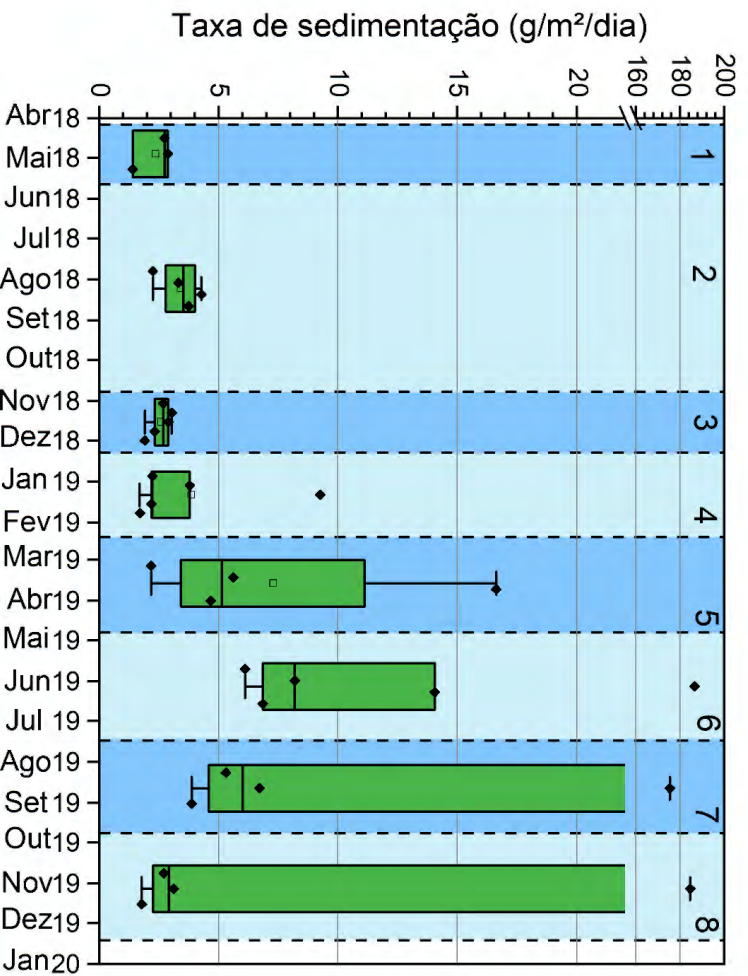


Figura 19 – Variação temporal da taxa de sedimentação da massa acumulada. O primeiro intervalo da cor azul representa o período da instalação das armadilhas até a primeira coleta, já a cor azul claro, o período da coleta 1 até a 2, assim por diante até a 8. Essa separação por cor, ajuda a identificar a tendência temporal das taxas.

A Figura 19 mostra que as taxas de sedimentação foram distribuídas pelas coletas realizadas, onde cada *box plot* contém todos os valores de todas as armadilhas do período. Verifica-se que nos meses de maio a outubro tanto para 2018 e 2019, as taxas de sedimentação são maiores do que os outros meses.

Para as coletas de 1 a 3 feitas em 2018, verifica-se que as taxas tiveram aumento da coleta 1 para a 2 e diminuição da 2 para 3. A coleta 2 foi a que apresentou maior mudança do intervalo de taxas, variando de 2,25 a 4,29 g/m<sup>2</sup>dia. Neste ano, as taxas se mostraram maiores para o inverno e metade da primavera, identificadas na coleta 2.

Iniciando a análise das coletas de 2019, os valores da sedimentação começam a aumentar tanto da coleta 4 para a 5 e da coleta 5 para a 6. Nesta última, os valores de todas as armadilhas chegam no seu ápice, nos meses de maio a julho (final do outono e metade do inverno). Logo em seguida, na coleta 7, nota-se uma diminuição que se repete para coleta 8. Então, constatou-se que de modo geral a variação temporal das taxas nos dois invernos apresentaram as maiores taxas de sedimentação, principalmente no inverno de 2019, e no verão foram encontrados os menores valores.

Para o ano de 2019, obteve-se maior variação das taxas de 1,69 a 186,65 g/m<sup>2</sup>dia, atentando que a posição das armadilhas foram modificadas. Além disso, foi identificado que para esse ano as precipitações foram melhores distribuídas e volumosas do que para o ano anterior. Com o aumento de pluviosidade de um ano para outro, implica-se também ao aporte diferenciado de material carregado para o reservatório. Sendo o ano de 2018, um ano hidrológico atípico, com longos períodos de seca, afetando a representatividade dos fenômenos de transporte de sedimentos no reservatório Passaúna.

Ainda na Figura 17, em conformidade com a Figura 19, identifica-se que a armadilha PARK foi a que apresentou a maior variabilidade temporal. Deste modo, além das mudanças sazonais, percebe-se que este ponto detém de outras fontes do aumento e diminuição da sedimentação como, por exemplo, a proximidade com a entrada do rio Passaúna, além de estar perto da entrada do segundo maior rio no reservatório na margem direita. Esses entre outros fatores contribuem para que esse ponto do lago artificial apresente grande variabilidade.

A Figura 20 apresenta as médias das taxas de sedimentação juntamente a quantidade de chuva acumulada por coleta, para identificar a variabilidade climática da sedimentação. Com isso, verificou-se que o período de maior acumulação de chuva (coleta 2) não foi o mesmo que apresentou a maior média da sedimentação (coleta 5), desconsiderando nas coletas 6, 7 e 8 a armadilha PPA e na coleta 7 e 8 o ponto do parque. Para observar a tendência sobre os dois anos de monitoramento, optou-se pela retirada dos valores do ponto PPA, que possui apenas 3 medições. Quanto a armadilha PARK, ela infelizmente foi perdida no reservatório, a partir da coleta 7.

O período de maior volume acumulado de chuva, entre os meses de julho e setembro de 2018 com a segunda coleta, também representa o maior intervalo de tempo entre coletas,

cerca de 5 meses. Contudo, analisando as coletas 6, 7 e 8, sem as taxas da armadilha PPA e PARK, observou-se que as maiores médias são do período com maior precipitação acumulada. Ainda, observa-se uma tendência das médias das taxas aumentando quando há elevação do acúmulo de chuva, exceto a coleta 5 e 8.

Para essa análise não levou-se em consideração o tempo de resposta entre o evento de chuva e a sedimentação. Essa dimensão temporal de resposta entre esses processos é complexa, e entre outros fatores, mostra em algumas armadilhas o atraso de resposta entre esses eventos. Contudo, o efeito de amortecimento da entrada de sedimentos no *buffer*, também influencia a deposição do material sólido nas armadilhas.

Ainda, sabendo que a coleta 6 foi a que apresentou as maiores taxas, Figura 19, não foi a coleta com maior volume de chuvas. Entretanto, para essa coleta, foi verificado que houve o maior registro de dias com alturas superiores a 30 mm de chuva diária, quando comparada as outras coletas. Isso pode ter propiciado maior aporte de sedimento para o reservatório nesta coleta. Fatores como cobertura vegetal e aumento da velocidade de escoamento podem influenciar a maior concentração de sedimentos na represa nas épocas de precipitações acentuadas.

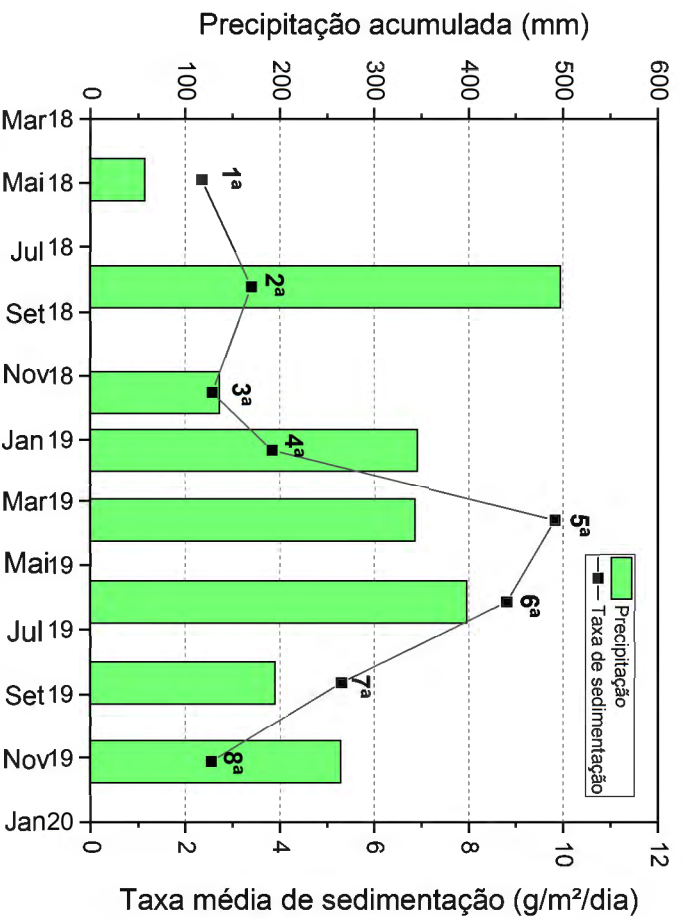


Figura 20 – Média das taxas de sedimentação e precipitação acumulada por coleta.

#### 4.1.3 Estimativa da Vida Útil do Reservatório

Para a estimativa da vida útil do reservatório Passaúna, foram utilizados os dados obtidos das campanhas de monitoramento das armadilhas de sedimento e do método de Brune. Em concordância com os resultados discutidos até aqui, as taxas de sedimentação

das armadilhas não podem ser transferidas diretamente para toda a superfície do reservatório, devido à diferença de distribuição dos sedimentos, além da influência do *buffer* (Figura 21).

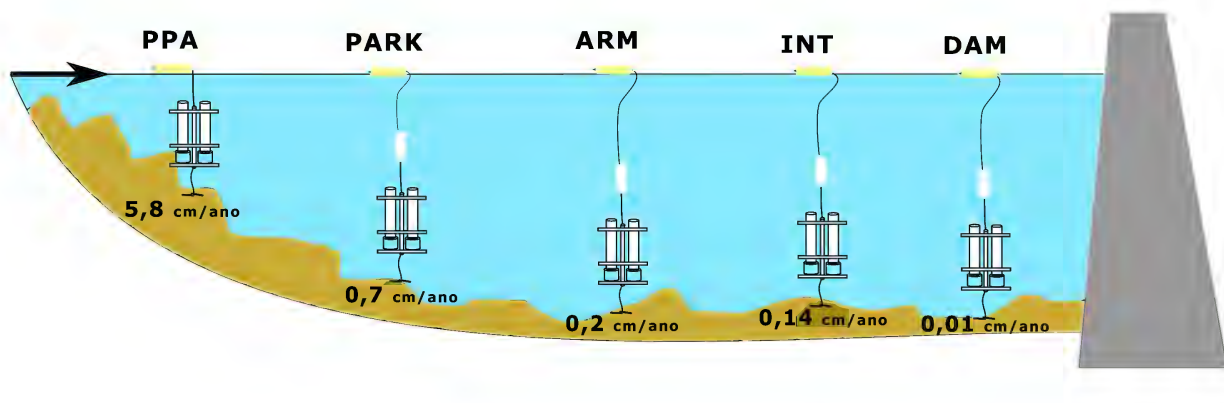


Figura 21 – Distribuição da taxa de sedimentação ao longo do reservatório.

Entretanto, visando uma estimativa da vida útil, a taxa média de sedimentação encontrada para o reservatório Passaúna – considerando todas as armadilhas de fundo – foi de 43,71 g/m<sup>2</sup>dia. Fazendo as ponderações das áreas do reservatório, a sedimentação resultou em 29,49 g/m<sup>2</sup>dia. A diferença do cálculo para a minimização dos efeitos da disposição de sedimentos é considerável, por isso foram considerados os dois valores na determinação do tempo de assoreamento e que está apresentado na Tabela 9.

Considerando os valores de área (3,96 km<sup>2</sup>) e volume (13,96 hm<sup>3</sup>) da cota mínima de operação (879,5 m), foram encontrados dois resultados. São 123 anos de diferença entre as duas estimativas. Ainda assim, sabendo que a sedimentação não é uniforme, o tempo médio de vida útil para a represa foi cerca de 315 anos.

O conceito teórico de vida útil para reservatórios é bastante conservador. Uma vez que, muito antes da soleira da tomada d'água ser atingida por sedimentos para inativar o uso do reservatório, a qualidade da água já tenda uma piora significativa em detrimento ao assoreamento. Com a degradação da água, o tempo de vida útil pode ser ainda menor do que o estipulado. É evidente a importância desse indicador para o gerenciamento de corpos hídricos, principalmente na fase inicial de construção, mas ele não é definitivo e único para definir a continuidade das atividades dos corpos hídricos.

Segundo Bufon, Landim e Melo (2009), o tempo de assoreamento pode ser modificado a cada ano. Ainda, Santos e Cunha (2015) completam que isso dependerá dos serviços ambientais prestados pelas áreas de conservação e do entorno a montante do reservatório, os quais são fundamentais para definir a futura dinâmica hidrossedimentométrica. Entretanto, com o avanço das mudanças climáticas que implicam em maior frequência de eventos extremos, aumentado o material sólido nos rios e lagos, esse tempo pode ser ainda menor.

Aplicando o método simplificado de Colby, encontra-se a curva chave de sedimentos apresentada no Apêndice A. Considerando a vazão média do rio Passaúna de 1,32 m<sup>3</sup>/s,



pela curva obtém-se o deflúvio sólido total de  $4,16 \cdot 10^3$  t/ano (11,41 t/dia). Esta descarga anual de sólidos é compatível com a encontrada por Rauen, Castro e Silva (2017), os quais mostram a descarga sólida total do rio Passaúna como 12 t/dia.

Com a aplicação de fato do método de Brune, a eficiência de retenção de sedimento foi 97%. Então, baseando-se nos cálculos de peso específico aparante dos depósitos da represa de  $0,90$  t/m<sup>3</sup>, o tempo de vida útil do Passaúna, considerando a cota 879,5 m, é 3139 anos.

Segundo Heinemarm (1981), a curva mediana de Brune pode superestimar a eficiência de retenção, em torno de 4% a 10%. Entretanto, este método apresentou um tempo de vida muito maior do que o estimado com as armadilhas. Então, mesmo que a retenção fosse menor o tempo de vida aumentaria. Em dimensões e granulometria do sedimento semelhantes a barragem estudada, Costa (2012) encontrou para o reservatório AHE Itaocara uma descarga sólida de 4.772 t/dia pelo método de Colby. Por isso, quando comparado a outros rios, o Passaúna apresentou uma descarga sólida total baixa, fazendo o tempo de vida ser elevado.

Estes cálculos indiretos possuem suas desvantagens quando comparados com medições diretas no local estudado. Apesar dos dados utilizados serem o do rio Passaúna (vazão líquida e concentração de sólidos suspensos), dentro do método de Colby houve a necessidade de estimar a descarga sólida de fundo não medida. Além disso, com a zona de amortecimento na entrada do rio, o método de Colby e Brune podem ficar comprometidos. Desta forma, a comparação dos resultados das armadilhas com o de Brune não foi compatível.

Para sintetizar as informações sobre o tempo de vida útil do reservatório Passaúna, foram extrapoladas taxas de sedimentação e o tempo de assoreamento a partir dos métodos e estudos já realizados. A Tabela 10 mostra os tempos finais obtidos por cada método.

O intervalo das taxas resultantes do estudo de Sauniti, Fernandes e Bittecourt (2004), foi utilizado para estimar o tempo de assoreamento, considerando a mesma densidade do sedimento do cálculo com as armadilhas, resultando em uma média de 325 anos. Essa média é bem aproximada do valor das armadilhas. Já para o estudo de Sotiri, Hilgert e Fuchs (2019), o volume de sedimentos total foi transformado em taxa de sedimentação e tempo de vida útil, resultando na maior taxa e menor tempo de vida útil entre todas as estimativas. Por fim, alguns tempos de vida útil do reservatório do Projeto MuDak, foram modificados e corrigidos para a cota mínima de operação, resultando em novos tempos de assoreamento. A medição acústica resultou em uma média de 311 anos. Já com os outros equipamentos, obtiveram-se maiores taxas e menores tempos de vida.

Em conclusão, a taxa de sedimentação que foi medida de fato com as armadilhas, sugere que o tempo de assoreamento final é de pelo menos 254 anos. Acredita-se que esse valor varia dependendo da área específica analisada no reservatório. De modo geral, o reservatório se beneficia com o efeito de amortecimento dos sedimentos no *buffer*, tendo um longo tempo antes que haja prejuízo ao abastecimento devido ao assoreamento. Entretanto,

Tabela 9 – Tempo de vida útil do reservatório Passaúna pelas armadilhas de sedimento.

Métodos	Vida útil	Taxas de sedimentação	
	(anos)	(g · m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	(cm/ano)
Por médias finais das armadilhas	254	43,71	1,39
Por média ponderada pela área	377	29,49	0,94

Tabela 10 – Resumo do tempo de vida útil do reservatório Passaúna.

Autor	Método	Taxa (cm/ano)	Vida útil (anos)
Autora, 2020	Armadilha	0,94 – 1,39	254–377
	Brune, 1953	-	3139
Sotiri, Hilgert e Fuchs, 2019	Ecobatimetria	3,11	113
Sauniti, Fernandes e Bittecourt, 2004	Uso de mapas	0,66 – 3,04	116–534
	Acústica	1,07 – 1,20	293–329
Projeto MuDak, 2020	Penetrômetro	1,90	185
	Testemunho	1, 51	233

após o enchimento do *buffer* pela carga sólida do rio Passaúna, acredita-se que os tempos estimados variem muito, e novas medições podem ser feitas para verificar as novas taxas de sedimentação.

## 4.2 Avaliação da Matéria Orgânica

O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado apenas para algumas amostras das coletas 2018 e 2019, especificamente para as coletas 2, 3, 6 e 7, devido à uma série de adversidades como, por exemplo, a logística de análise, onde as amostras precisavam ser enviadas para a Alemanha. Os teores de matéria orgânica dos sedimentos amostrados, determinados por perda de peso por ignição, estão apresentados na Tabela 11.

Analisando a Tabela 11, observou-se que as amostras de superfície mostram quotas de matéria orgânica significativamente mais altas, de  $\approx 25\%$  até  $45\%$  do que as das armadilhas de fundo, que variam entre  $\approx 15\%$  a  $\approx 24\%$ . Isso pode ser explicado pelo fato de que nas campanhas de monitoramento realizadas em 2018, as armadilhas posicionadas a 2 m da superfície, mostraram que as amostras possuíam um filme fino de algas sobre o sedimento. A corda de ancoragem, a armadilha e o frasco também estavam envoltos por um biofilme de algas, inclusive, na parte interna do frasco, como é registrado na Figura 22. Então, essas amostras seriam caracterizadas como uma mistura de material sedimentado e criado devido à produção primária, com contribuição autóctone. Esta produção é limitada pela turbidez do corpo hídrico e pela profundidade, pois ela está ligada diretamente a entrada de luz, que é maior nos primeiros metros de coluna d'água.



Figura 22 – Recipiente da armadilha *Intake*, posicionada na superfície, da coleta 3 em 2018.

Tabela 11 – Teor de matéria orgânica (%) nas armadilhas.

Armadilha	Posição	Matéria Orgânica (%)			
		(2)	(3)	(6)	(7)
PPA	Fundo	-	-	15,20	20,80
PARK	Fundo	-	20,12	20,30	-
ARM	Fundo	-	-	19,00	18,00
INT	Superfície	26,18	44,82	-	-
	Fundo	19,12	23,16	19,40	19,10
DAM	Superfície	25,15	43,06	-	-
	Fundo	21,72	23,62	22,50	20,60

Em contraste com as taxas decrescentes de sedimentação mais próximas da barragem, a porção orgânica das partículas depositadas aumenta com a distância da entrada da represa, Figura 23. Aumenta de  $\approx 15\%$  a  $\approx 25\%$  no fundo, próximo à barragem. Esse resultado já era esperado de acordo com Nowlin, Evarts e Vanni (2005), os quais afirmam que a proporção de material autóctone é maior nas proximidades da barragem. Já os teores de MO estão de acordo com os Hilgert, Sotiri e Fuchs (2019), que afirmam porcentagem média de MO em 17% no sedimento no local de estudo.

Constatou-se que houve aumento de MO na coleta 3 em relação a 2, tendo os valores da última coleta de 2018 (3) quase o dobro de MO nas armadilhas da superfície, reportados na Tabela 11. Entende-se que como o tempo da coleta entre as amostras foi diferente, sendo quase cinco meses para a coleta 2, pode ter havido decomposição da MO e a coleta 3, com um mês e meio, houve apenas a decomposição parcial dela. Ainda segundo Rosa, Bloesch e Rathke (1994), os processos físicos, químicos e biológicos que podem ocorrer com as partículas são a decomposição, mineralização, dissolução, adsorção, coagulação, precipitação, formação de "pelets" fecais e degradação bacteriana. Fazendo a matéria

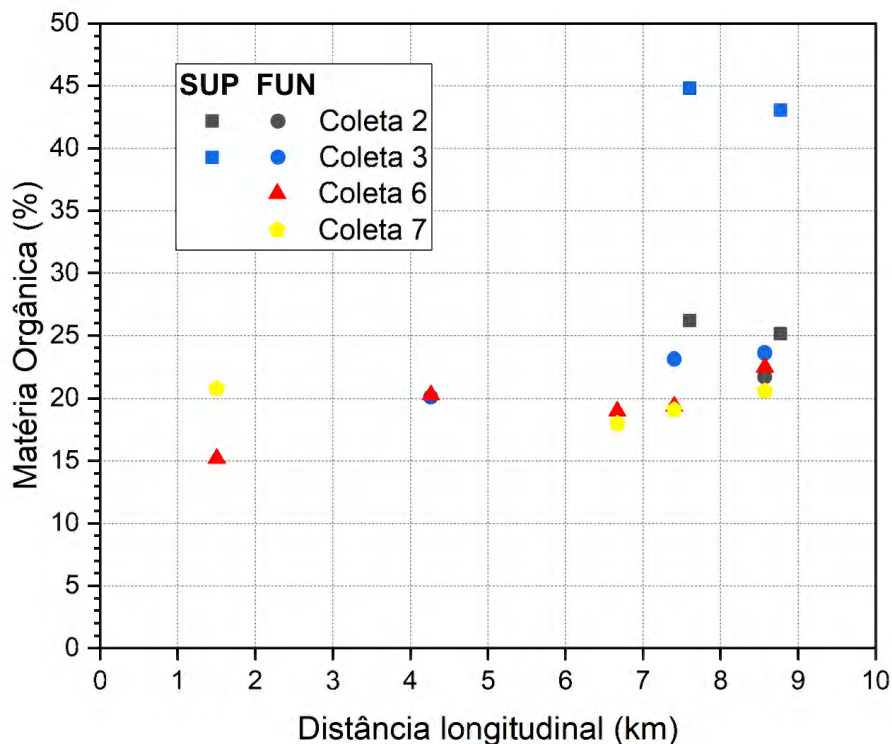


Figura 23 – Matéria orgânica ao longo do reservatório.

orgânica ser menor nas amostras de profundidade e períodos de coletas maiores. A correlação estatística entre a profundidade da armadilha e a porcentagem de MO foi negativa ( $r = -0,864$ ;  $r = -0,867$ ), para coleta 2 e 3, respectivamente. Isto é mais uma evidência estatística que a MO diminui com a profundidade do reservatório Passaúna.

Nas coletas de 2019 (6 e 7), observou-se consonância entre os valores, que são próximos, tendo maior variância com a armadilha PPA que variou de 15% para cerca de 20% na última coleta analisada. A proximidade dos valores dessas coletas na maioria dos pontos coletados, se assemelham ao período que demoraram a serem coletadas, ficando expostas aos outros processos físicos, químicos e biológicos pelo mesmo tempo.

Quanto ao pH do sedimento, houve correlação negativa de  $r = -0,751$ , com relação à distância das armadilhas, isso implica que quanto mais perto da barragem, menor é o pH. Quanto à correlação dessa característica e a profundidade, obteve-se para o pH, uma correlação também negativa ( $r = -0,580$ ), indicando uma tendência de aumento do valor na superfície, visto que quanto mais profundo, mais anóxico e ácido é o ambiente. Perfis de oxigênio dissolvido (OD) são medidos no reservatório, por meio de sondas paramétricas, as quais mostram o OD em baixa concentração no fundo do reservatório Passaúna, propiciando a anoxia.

### 4.3 Avaliação do Fósforo Total

A determinação do fósforo total ( $P_T$ ) foi realizada para as amostras das coletas 2, 3, 4, 6 e 7. A taxa média de sedimentação do  $P_T$  encontrada, considerando todas as armadilhas, foi de 50,08 mg/m<sup>2</sup>dia, isso resultaria em 155,39 t/ano de fósforo total sedimentado. Isso implica em uma taxa de aporte na bacia hidrográfica de 1,0 t/km<sup>2</sup>ano.

Sabendo que o uso do solo da bacia hidrográfica é predominantemente agrícola 48% e coberta por diferentes tipos de vegetação 43% (IAP, 2017), acredita-se que grande parte do  $P_T$  venha do uso intensivo de fertilizantes. De acordo com Bittencourt (2003), a exportação de fósforo de áreas naturais e de cultivo para o reservatório Piraquara II, o qual também abastece a região metropolitana de Curitiba, foi de 0,859 kg/ha.ano. Este valor é 10 vezes inferior ao aporte da bacia do rio Passaúna.

A concentração desse elemento, encontrada nas amostras, não apresentou alterações bruscas nos valores, com o  $P_T$  variando de 0,73 a 2,01 mg/g de sedimento. Dornfeld (2002), analisou esse nutriente no sedimento do reservatório Salto Grande em São Paulo e encontrou altas concentrações de 0,2 a 0,6 mg/g. Já Carmo (2000), estudou a concentração no sedimento e a taxa de sedimentação do Lago das Garças em São Paulo, encontrando 0,2 a 1,6 mg/g e 0,88 mg/m<sup>2</sup>dia, respectivamente. Com isso, observou-se que a concentração nas amostras do Passaúna são elevadas.

Apesar disso, o corpo hídrico deste estudo é caracterizado como limpo e de baixa produtividade algal (IAP, 2017). Entretanto, é importante fazer monitoramento contínuo deste nutriente, devido à sua capacidade de incorporação ao sedimento e sob circunstâncias ideais do meio, ser liberado por longos períodos, mesmo o aporte externo ter sido encerrado. Desta forma, esse componente pode ser prejudicial à longo prazo na represa e se tornar um fator poluente, causando a degradação do ambiente aquático pela eutrofização (SILVA et al., 2010).

Sabe-se que quanto maior a profundidade mais anóxico e com isso aumenta as condições de liberação de fósforo para a coluna d'água. Ainda, a estratificação térmica pode sofrer a alteração intermitente da espessura do epilímnio, que leva a troca de água entre o epilímnio e hipolímnio, fazendo uma mistura vertical parcial, induzindo maior interação da coluna d'água com o sedimento de fundo (ARRUDA, 2015).

Em termos de distribuição, assim como para a massa do sedimento acumulado, a Figura 24 apresenta a variação espacial da deposição do  $P_T$  ao longo do reservatório. No gráfico estão as taxas de sedimentação por coleta pela distância que cada armadilha está instalada a partir da entrada do rio Passaúna na represa.

Apesar de as concentrações desse nutriente serem semelhantes para todas as amostras, quando analisam-se as taxas de sedimentação, consideram-se as massas dos sedimentos coletados. Dessa forma, o fluxo de deposição encontrado foi uma relação diretamente proporcional entre o peso do sedimento e o nutriente, ou seja, sedimentação diferencial ao longo do reservatório e diminuição das taxas de montante a jusante.

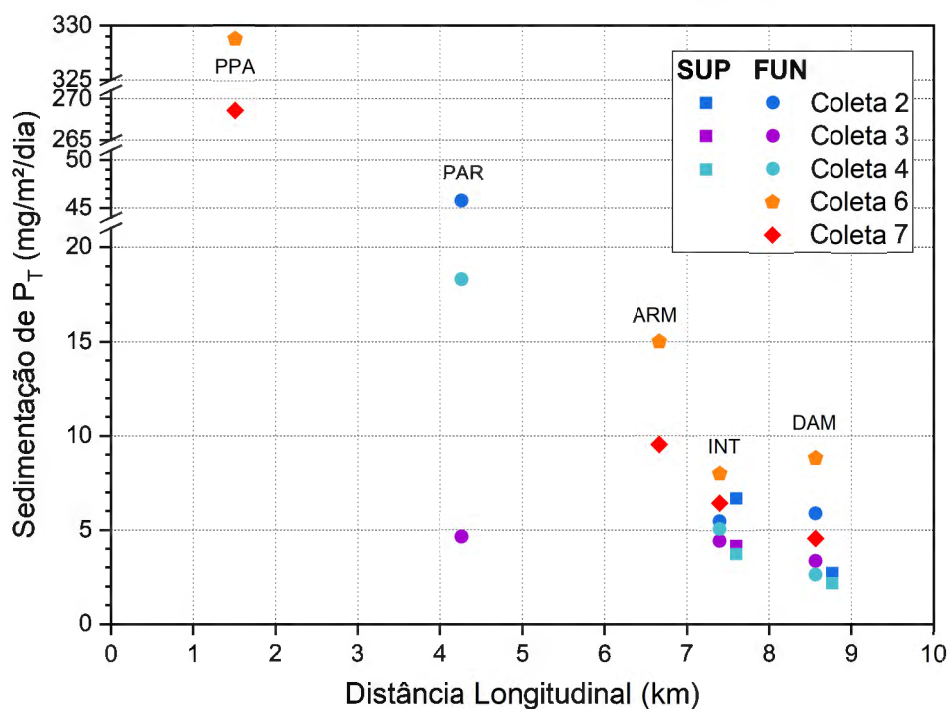


Figura 24 – Variação espacial da taxa de sedimentação do  $P_T$ .

Entretanto, essa proporcionalidade não foi encontrada na amostra da armadilha INT posicionada na superfície na coleta 2 e na armadilha DAM na coleta 6. Apesar de a massa ser menor na superfície, INT S apresentou maior sedimentação de  $P_T$  quando comparada a INT B. Isso pode ser explicado, pelo fato da concentração de  $P_T$  na superfície ser a maior, entre todas as coletas. Além disso, contrapondo-se a distância, DAM na coleta 6, apresentou maior deposição desse elemento que a armadilha INT da mesma coleta, mesmo sendo a menos pesada. Para este caso a concentração de fósforo foi maior 1,43 mg/g em DAM e 1,15 mg/g em INT.

Seguindo essa lógica, a armadilha PPA, apresentou os maiores valores de  $P_T$  nas coletas 6 e 7. A armadilha PARK apresenta a maior variabilidade dos valores, concordando com os de massa. Já os menores valores foram encontrados em DAM B e DAM S (4), e o menor valor absoluto em DAM S (4), com maior proximidade da barragem. Observa-se que os valores de  $P_T$ , conseqüentemente a taxa de sedimentação, tendem a ser maiores no fundo, exceto na armadilha INT S na coleta 2.

Para examinar a variação temporal dos fluxos de deposição de  $P_T$ , foram gerados os *box plots* da Figura 25. Verifica-se que nos meses de abril e junho de 2019, as taxas de sedimentação são maiores que o restante dos outros meses, seguido pelos meses de julho e setembro do mesmo ano. Neste caso, observaram-se as maiores taxas de sedimentação de  $P_T$  no final do outono e no inverno, ou seja, uma ascendência das taxas no inverno para o fósforo total, assim como para o sedimento, tendência que acompanha o aumento de dias

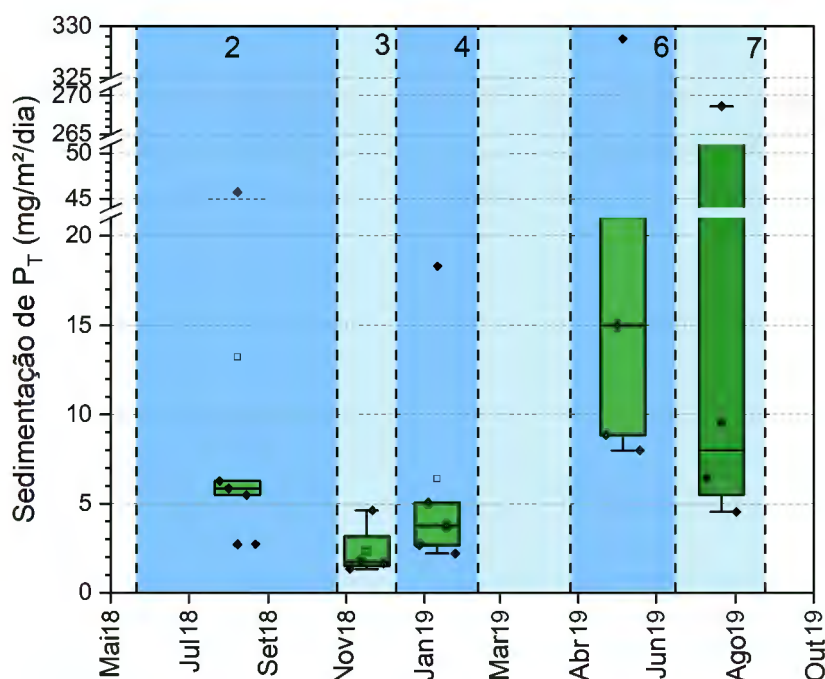


Figura 25 – Variação temporal da taxa de sedimentação do  $P_T$ . Cada *box plot* contém todos os valores de todas as armadilhas de uma coleta. Os meses entre cada um, estão representados por cores diferentes como mostrados no gráfico. O primeiro tom de azul representa o período da coleta 1 a até a 2, o tom mais claro da 2 até a 3, alternando assim até a 7. Essa separação por coleta, ajuda na identificação da tendência temporal das taxas.

com maiores alturas precipitadas nesses períodos. Bittencourt (2003) observou a mesma tendência em seu estudo, ou seja, maior a exportação de fósforo total em períodos com mais precipitações.

Em relação à profundidade, esse componente para a coleta de outubro (2) e dezembro (3) e a primeira coleta de 2019 (4)  $r = 0,33$ ;  $r = -0,17$ ;  $r = 0,09$ , respectivamente, não possuem correlação com a variação da taxa de sedimentação. Por outro lado, as coletas 6 e 7 apresentaram correlação negativa  $r = -0,88$  e  $r = -0,94$ , o que indica que o fósforo total é maior na superfície da coluna d'água.

#### 4.4 Avaliação do Nitrogênio Total

Assim como para o  $P_T$ , o nitrogênio total ( $N_T$ ) foi determinado apenas para as coletas 2, 3, 4, 6 e 7. O fluxo médio de deposição do  $N_T$  encontrado foi de  $190,52 \text{ mg/m}^2/\text{dia}$ , o que resultaria em  $591,1 \text{ t/ano}$  de nitrogênio total depositado no reservatório. Fato que implica em uma taxa de aporte na bacia hidrográfica de  $3,8 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ .

A fonte do  $N_T$  também pode ser atribuída a utilização de fertilizantes nas propriedades agrícolas da bacia hidrográfica do Passaúna. Sabendo disso, Diogo et al. (2003) compilaram taxas de exportação de  $N_T$  de áreas agrícolas ou zonas com vegetação arbustiva, e obteve valores de  $0,27 \text{ t/km}^2/\text{ano}$ . Já os resultados de acúmulo de nutriente do estudo de López-

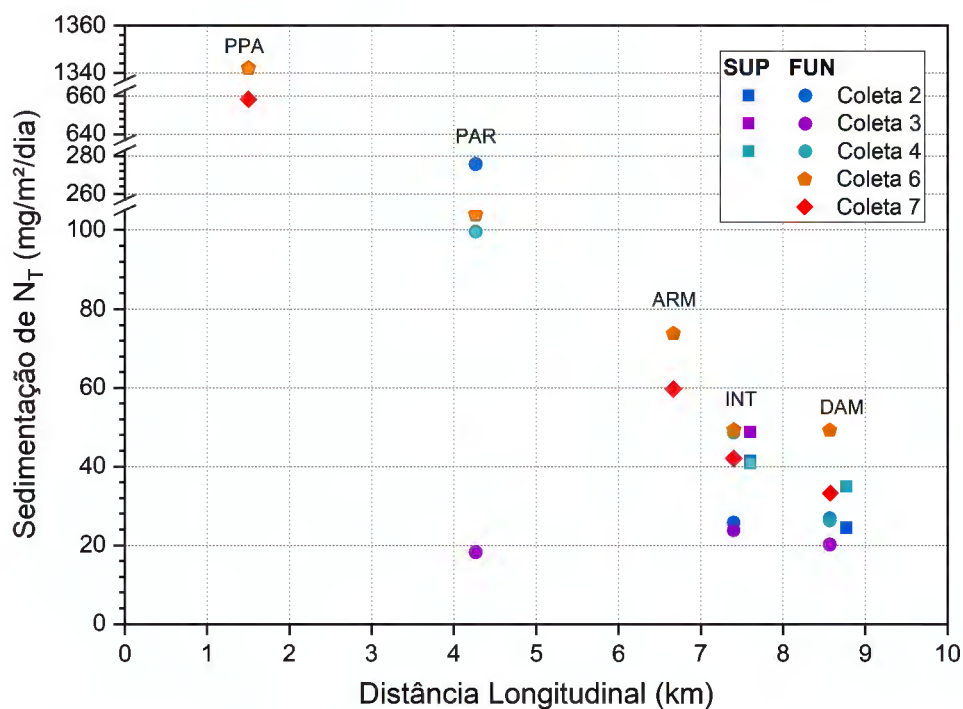


Figura 26 – Variação espacial da taxa de sedimentação do  $N_T$ .

Tarazón et al. (2016) no reservatório Barasona na Espanha, foram de 222 t/ano. Com estes resultados, a bacia do rio Passaúna, bem como, a represa se mostraram grandes acumuladores de nitrogênio total.

Os valores de  $N_T$  variam de 3,75 a 20,99 mg/g de sedimento nas amostras. Verifica-se maior abundância desse nutriente, quando comparado com o fósforo total. Kunz et al. (2011), ao analisar a concentração de nitrogênio no sedimento no lago Kariba, entre a Zâmbia e Zimbábue, encontrou 5,1 a 9,5 mg/g. Carmo (2000), além de avaliar o  $P_T$  no sedimento, também encontrou valores para a concentração de  $N_T$ , 3,88 a 13,81 mg/g, e de 737,65 mg/m<sup>2</sup>/dia para a taxa de afundamento no Lago das Garças. Já Leite (1998), obteve taxas de 700 a 3.300 mg/m<sup>2</sup>/dia, no Reservatório Salto Grande. Então, o fluxo de deposição do nitrogênio no reservatório Passaúna é baixo comparado a outros corpos hídricos, porém possui alta concentração no sedimento para uma represa oligotrófica. A complexidade da dinâmica do nitrogênio no sedimento não é muito conhecida, mas sua disponibilidade para a coluna d'água é facilitada pela mineralização da matéria orgânica (JAMES et al., 2011).

Em relação a disposição desse nutriente na represa, na Figura 26, estão os valores das taxas de sedimentação de  $N_T$  das coletas de 2018 e de 2019, gerados para verificação da variação espacial. Da mesma maneira que o  $P_T$ , o  $N_T$  foi relacionado às massas de sedimento dos frascos para a obtenção da sedimentação desse componente.

Igualmente à massa de material coletado, o nitrogênio total tem maior deposição na entrada do rio na represa e gradualmente há uma diminuição nas adjacências da barragem.



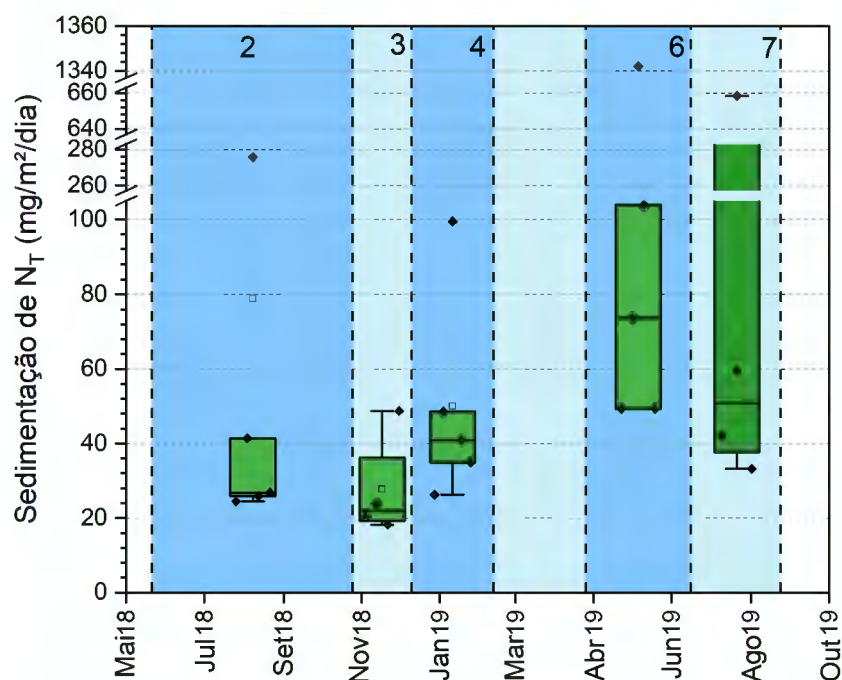


Figura 27 – Variação temporal da taxa de sedimentação do  $N_T$ . Igualmente ao fósforo, cada *box plot* contém todos os valores de todas as armadilhas de uma coleta. Os meses entre cada um, estão representados por cores diferentes como mostradas no gráfico. O primeiro tom de azul representa o período da coleta 1 a até a 2, o tom mais claro da 2 até a 3, alternando assim até a 7.

Diante dessa exposição, a armadilha PPA, apresentou os maiores valores de  $N_T$  nas coletas 6 e 7. Além disso, a coleta 6 deteve os maiores valores de deposição em todas as armadilhas. A armadilha PARK apresenta a maior variabilidade dos valores, concordando com dados de massa. Já os menores valores foram encontrados em INT B e DAM B, e o menor valor absoluto em PARK, todos na coleta 3. É interessante ressaltar que nessa coleta verificou-se o menor tempo de exposição na coluna d'água, por conseguinte, a menor quantidade de material aprisionado nos equipamentos. Pela relação diretamente proporcional com a massa do sedimento, o  $N_T$  depositado nessas áreas, variou conforme o peso das amostras.

Muito embora, as taxas de sedimentação tendem a ser maiores no fundo, alguns dos fluxos de  $N_T$  apresentaram valores aumentados no topo da coluna d'água, como mostrou as coletas 2, 3 (INT S) e 4 (DAM S). Neste caso, acredita-se que esses valores estejam relacionados ao tempo de detenção hidráulico, pois quanto maior o tempo das águas dentro do reservatório (menor a renovação de águas), maior a produção de material autóctone de nitrogênio (CARMO, 2000).

Os dados de  $N_T$ , também serviram para identificar a variação temporal de deposição de  $N_T$ , conforme a Figura 27. As taxas foram distribuídas da mesma maneira que para o fósforo total. Inclusive, observou-se as mesmas tendências das taxas de  $P_T$ , ou seja, maiores taxas de sedimentação de  $N_T$  no fim do outono e inverno, dos meses de abril a setembro de 2019. Esse é o período identificado com chuvas de maior volume diário, fato que pode aumentar a descarga sólida total e com nitrogênio depositada na represa.

O  $N_T$  para a coleta de dezembro (3) de 2018, de julho (6) e setembro (7) de 2019, apresentaram correlações negativas ( $r = -0,83$ ;  $r = -0,87$ ;  $r = -0,94$ ), respectivamente, as quais indicam que o fluxo descendente de  $N_T$  diminui com a profundidade do reservatório, igualmente a MO. No entanto, a coleta de outubro (2) e a primeira coleta de 2019 (4) não apresentou correlação ( $r = -0,47$ ;  $r = -0,20$ ).

Por fim, as relações N/P mássicas resultaram como nutriente limitante o nitrogênio total oriundo dos sedimentos das armadilhas de fundo ( $N/P < 9$ ). Por outro lado, as amostras de superfície indicaram o fósforo como nutriente limitante ( $N/P > 9$ ). Essas relações estão de acordo com Salas e Martino (2001).

## 4.5 Implicações para Gestão

O monitoramento dos recursos hídricos é fundamental para a gestão ambiental, sendo uma importante ferramenta para diagnosticar os impactos das ações humanas na qualidade da água e no ambiente aquático. Desta forma, é possível identificar a degradação ambiental e propor ações para mitigá-las.

De acordo com os resultados apresentados nesta dissertação, ressalta-se a importância da zona de amortecimento da entrada do rio Passaúna neste reservatório, no combate à problemática sedimentológica, o assoreamento. Com a utilização do equipamento de aprisionamento de sedimento, pôde-se obter com melhor precisão a distribuição e características físicas, químicas e biológicas, de cinco áreas do lago artificial, do material suspenso que fica retido.

Os dados fornecidos pelas armadilhas são valiosos para identificar alguma fonte poluente e a busca por soluções mais rápidas. O tempo de monitoramento pode ser variável, por isso é um instrumento que oferece dados, que registram as variações na dinâmica interna desse ambiente em um determinado período. A recomendação, para o reservatório Passaúna, é de um período de 45 dias para as armadilhas próximas a barragem e captação. Esses equipamentos possuem baixa sedimentação e tempos menores podem não conter amostras suficientes para as análises. Já para os dispositivos das demais localidades, recomenda-se 25 dias entre as coletas, pois estes tem maior acúmulo de material. Além disso, pode-se observar as variações sazonais, e qual a característica de cada uma delas. Entretanto, como todo equipamento de monitoramento possui suas vantagens e desvantagens, estas estão citadas abaixo:

### 1. Vantagens:

- a) É um equipamento que representa uma alternativa de baixo custo orçamentário para investigar a qualidade dos sedimentos;
- b) É uma metodologia simples para avaliação da taxa de sedimentação pontual;
- c) Protege o planejamento de longo prazo para a operação do reservatório;

- d) O material coletado pode ser analisado em laboratório, permitindo variadas análises;

## 2. Desvantagens:

- a) As armadilhas estão desprotegidas de roubos, o que pode comprometer o monitoramento;
- b) Na superfície, as amostras são prejudicadas pelo crescimento de algas;
- c) Peixes e outros invasores podem prejudicar as medições;
- d) Informação pontual;
- e) Não oferece uma estimativa robusta da massa de sedimentos do reservatório;

Entende-se que a armadilha de sedimento é apenas mais um dentre outros tantos equipamentos para medição limnológica. Assim como todos os outros equipamentos, este possui seus inconvenientes, como por exemplo, a variabilidade da armadilha PARK. Para uma melhor compreensão da dinâmica dos sedimentos e melhor estimativa de taxa de sedimentação no reservatório do Passaúna, seria interessante fazer análises quanto ao levantamento batimétrico e calcular as áreas de erosão, transporte e deposição dos materiais, além de outras variáveis morfométricas.

Uma análise conjunta dos dados da armadilha, atrelada a batimetria, dados de espessura, do núcleo de sedimentos, a medição da turbidez e material em suspensão, o balanço de massa do reservatório, a modelagem matemática, a qualidade da água, entre outros, resultaria em uma poderosa ferramenta de gerenciamento de recursos hídricos.

Contudo, as ações que podem ser direcionadas com as análises dos resultados desta pesquisa, se resumem a verificar qual a parte mais crítica e que necessita de ações de curto a médio prazo. Por isso, fazer o prognóstico do tempo de assoreamento com as armadilhas é importante, pois mostra a taxa em locais específicos. Especificidades que são comprometidas em acurácia com os outros métodos citados acima.

Com isso, a parte mais crítica da análise consistiu no trecho inicial, após a passagem do rio pela ponte Ferraria. Neste ponto, a altura da coluna d'água teve uma média de 3,37 m. Em 58 anos, esse trecho estaria cheio de sedimento. Isso é preocupante, pois há um estreitamento do canal do rio para o corpo hídrico principal, e se essa área estiver assoreada, poderia impedir a passagem do rio. É de grande importância a continuidade do monitoramento e também um planejamento para dragagem dessa região.

Nas outras áreas avaliadas, a sedimentação é menos grave e não causa preocupação a curto prazo. É interessante manter o monitoramento, pois ainda haveriam dados para a gestão da qualidade da água, visto a grande disponibilidade de fósforo e nitrogênio total no sedimento, que podem contribuir para floração de algas e eutrofização, comprometendo o abastecimento público. Caso o monitoramento encontre sinais de aumento desses macronutrientes, ações contra o aporte de nutrientes devem ser tomadas. Estratégias

preventivas e integradas de re-oligotrofização, processo de diminuição de nutrientes em ecossistemas aquáticos para retorno ao estado original ou de menor trofia, agem como inverso da eutrofização, podem ser adotadas para a bacia do rio Passaúna, além investigar fontes difusas de nutrientes como esgotos clandestinos (ARRUDA, 2015).

## 5 Conclusões

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”*

A. Einstein

### 5.1 Considerações Finais

As armadilhas de sedimento se mostraram bons equipamentos para mensurar a taxa de sedimentação do reservatório Passaúna, bem como avaliar a variação temporal e espacial. Com elas, foi possível verificar o fluxo descendente de material suspenso em cinco localidades diferentes, por um período de aproximadamente dois anos de monitoramento. A taxa média de sedimentação do reservatório Passaúna, medida com esse dispositivo, variou de 0,936 a 1,39 cm/ano.

Entretanto, a sedimentação apresentou distribuição diferencial ao longo do reservatório, variando de 5,8 cm/ano na entrada (armadilha PPA) até 0,01 cm/ano nas proximidades da barragem (armadilha DAM), ou seja, a diminuição dos valores dos fluxos de deposição ocorre de montante a jusante no lago artificial. Observou-se também, que os depósitos de remanso, na região da montante, eram ligeiramente mais grossos que os depósitos delta, que ocorrem ao longo do corpo hídrico.

Além disso, a sedimentação apresentou variação vertical na coluna d'água, ou seja, foi observado maior aprisionamento de material suspenso em armadilhas instaladas no fundo do reservatório. Inúmeros podem ser os fatores decorrentes da estratificação térmica e dinâmica interna da represa como, por exemplo, as correntes de turbidez e a ressuspensão de material de fundo, que aumentam os sólidos depositados nestes equipamentos.

A variação temporal das taxas mostra que nos invernos ocorreram as maiores taxas de sedimentação, principalmente no inverno de 2019, e no verão foram encontrados os menores valores. Por outro lado, os índices pluviométricos dos invernos tiveram seus menores valores, indicando que o aumento da sedimentação não está acompanhado de períodos com grande volume de chuvas. Muito embora, para o ano de 2019 no inverno, quando houve o maior valor absoluto das taxas, observou-se o maior número de dias com precipitações volumosas. Então, acredita-se essas chuvas acentuadas propiciaram maior aporte de sedimento para a represa.

Ainda assim, o fluxo médio de sedimentação calculado pelo uso desses equipamentos é baixo, considerando que o tempo de vida útil estimado para o Passaúna foi de pelo menos cerca de 254 anos. Esse tempo encontrado com as armadilhas, está próximo dos outros

estudos e equipamentos empregados para esta análise no reservatório. Já com a aplicação do método de Brune, encontrou-se uma eficiência de retenção de sedimento de 97% e o tempo de vida útil do Passaúna, considerando a cota mínima de operação, de 3139 anos. Todavia, a pequena área alagada que antecede o corpo hídrico principal do reservatório, faz com que esse método permita apenas um prognóstico do tempo de vida útil, pois utiliza dados de descarga sólida do rio e não a descarga que entra no corpo principal. Além do mais, o deflúvio sólido total do rio Passaúna, determinado pelo método de Colby, é pequeno e eleva o tempo de assoreamento.

Quanto às análises químicas feitas sobre as amostras, o teor de matéria orgânica nas armadilhas de superfície em relação às que estavam no fundo do reservatório foi maior, apresentando teores de 45% no sedimento coletado. Além disso, as amostras de superfícies foram caracterizadas como uma mistura de material sedimentado com de origem autóctone, pois continham um biofilme de algas no interior dos frascos amostrais. A variação longitudinal deste componente, mostrou que a porção orgânica é maior mais a jusante do reservatório, aumentando de 15% a 25%.

Também foram avaliadas as sedimentações diferenciais ao longo do reservatório, do fósforo e do nitrogênio total. Como as concentrações desses elementos estão relacionadas proporcionalmente às massas das amostras, em sua maioria, observou-se a diminuição das taxas de montante a jusante. Entretanto, quanto à variação vertical desses elementos na coluna d'água, apenas as duas últimas análises apresentaram correlação de decrescimento do fósforo e nitrogênio total com o aumento da profundidade, porém com as demais coletas não é possível afirmar que a deposição desses nutrientes é maior na superfície. Nestes casos, observaram-se que as variações temporais indicam que as maiores taxas de sedimentação de  $P_T$  e  $N_T$  ocorrem no final do outono e no inverno.

As taxas de exportação do  $P_T$  e  $N_T$  foram 1,0 t/km<sup>2</sup>ano e 3,8 t/km<sup>2</sup>ano, respectivamente. Quando comparadas à outras taxas de diferentes bacias hidrográficas, constatou-se que apesar do corpo hídrico ser enquadrado como oligotrófico e apresentar baixa produtividade algal, a exportação é elevada. Sabe-se que a predominância do uso do solo da bacia é destinado a agricultura e cobertura vegetal, com uma pequena parte urbana. Então, acredita-se que o grande aporte desses nutrientes é principalmente devido ao uso intensivo de fertilizantes, e a outra parte por cargas difusas que podem vir de esgotos clandestinos ligados diretamente no rio Passaúna.

É importante ressaltar que o uso da armadilha para verificar os fluxos de sedimentação dos nutrientes e matéria orgânica, produz dados fundamentais para calibração de modelos que estudam a dinâmica desses nutrientes em reservatórios, a qualidade da água, entre outros. De maneira geral, o reservatório está em boas condições e a gestão sobre ele está sendo melhorada através do Projeto MuDak. Por isso, os dados das armadilhas foram discutidos com detalhes, pois esses dados serão essenciais para calibrar modelos de sedimentação, para uma análise mais sofisticada.

## Referências

- ABDERREZZAK, K.; FINDIKAKIS, A. Reservoir Sedimentation : Challenges and Management Strategies. p. 66–94, 2018.
- AGRAWAL, Y. C. et al. Light scattering by random shaped particles and consequences on measuring suspended sediments by laser diffraction. *Journal of Geophysical Research*, v. 113, p. 1–11, 2008.
- AGUIAR, A. C. N. et al. Mapeamento topo-batimétrico de reservatório utilizando lidar e batimetria no lago paranoá–df. In: *Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2019.
- ALVES, E. Sedimentação em albufeiras por correntes de turbidez. *Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico*, 2008.
- ANA. *Portal da Qualidade das Águas*. 2019. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>.
- APRILE, F. M.; JR, I. B. Adequação metodológica para determinação de fósforo total em macrófitas aquáticas e sedimentos. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 8, p. 57–64, 2003.
- ARAÚJO, A. M. Evolução do processo de assoreamento em reservatório urbano. *Anais... IV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos e I Encontro de Engenharia de Sedimentos do Mercosul, Santa Maria-RS*, 2000.
- ARRUDA, N. O. d. *Controle do aporte de fósforo no reservatório de Itaparica localizado no semiárido nordestino*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- BACH, L.; NIELSEN, M.; BOLLWERK, S. Environmental Impact of Submarine Rock Blasting and Dredging Operations in an Arctic Harbor Area: Dispersal and Bioavailability of Sediment-Associated Heavy Metals. *Water Air Soil Pollut*, Springer, v. 228, p. 198, 2017.
- BARBOSA, A. A. *Correntes de Densidade em Reservatórios*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- BEZERRA, A. J. et al. O potencial de liberação de fósforo de um reservatório localizado na região semiárida tropical brasileira. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*. João Pessoa, PB: [s.n.], 2017. v. 5, p. 1243–1246.
- BITTENCOURT, S. *Carga máxima de fósforo admissível ao Reservatório Piraquara II, Região Metropolitana de Curitiba, uma aplicação do Processo TMDL*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- BLOESCH, J.; BURNS, N. M. A critical review of sedimentation trap technique. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie*, v. 42, n. 1, p. 15–55, 1980.
- BRANCO, N. *Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 1998.

- BRUNE, G. M. Trap efficiency of reservoirs. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Wiley Online Library, v. 34, n. 3, p. 407–418, 1953.
- BRUNE, R. A. *Métodos de Estimativa de Descarga Sólida em Rios - Análise Comparativa*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- BRUNETTO, G. et al. Avaliação do método de perda de peso por ignição na análise de matéria orgânica em solos da serra gaúcha do rio grande do sul. *Ciência Rural*, SciELO Brasil, v. 36, n. 6, p. 1936–1939, 2006.
- BUFON, A. G. M.; LANDIM, P. M. B.; MELO, J. S. C. D. Estimativa do tempo de vida útil de represa de pequeno porte. *Acta Scientiarum. Technology*, Universidade Estadual de Maringá, v. 31, n. 1, p. 87–92, 2009.
- CABRAL, J. B. P. Estudo do processo de assoreamento em reservatórios. *Caminhos de Geografia*, v. 6, n. 14, p. 62–69, 2005.
- CARMO, C. F. d. *Aporte de nutrientes, nitrogênio e fósforo, e sua relação com os impactos antropogênicos em um lago urbano, São Paulo, SP, Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000.
- CARNEIRO, C.; KELDERMAN, P.; IRVINE, K. Assessment of phosphorus sediment-water exchange through water and mass budget in Passaúna Reservoir (Paraná State, Brazil). *Environmental Earth Sciences*, p. 1–14, 2016.
- CARPENTER, S. R. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 105, n. 32, p. 11039–11040, 2008.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. [S.l.]: Rio de Janeiro: CPRM, 1994. v. 372.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. [S.l.]: Interciência, 2008. 599 p.
- CARVALHO, N. O. et al. *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Brasília: ANEEL, 2000.
- CARVALHO, N. O. et al. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000.
- CHALAR, G.; TUNDISI, J. G. Phosphorus fractions and fluxes in the water column and sediments of a tropical reservoir (lobo-broa - sp). *International Review of Hydrobiology*, v. 86, n. 2, p. 183–194, 2001.
- COIADO, E. M.; PAIVA, J. B.; PAIVA, E. M. Assoreamento em reservatórios. *Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. ABRH, Porto Alegre, 2003.
- COLBY, B. R. Relationship of unmeasured sediment discharge to mean velocity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, Wiley Online Library, v. 38, n. 5, p. 708–717, 1957.
- CORREIA, M. A. A. C. d. et al. *Escoamento de correntes de turbidez sobre múltiplos obstáculos*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2012.



- COSTA, L. F. *Análise De Sensibilidade Dos Parâmetros Utilizados Na Determinação De Taxas De Assoreamento De Reservatórios*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- DEMIR, M.; MAKINECI, E.; KARTALOGLU, M. Monitoring of grain size fractions of sediment from different forest road types. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, v. 14, n. 4, p. 1559–1568, 2013.
- DIOGO, P. et al. Estimativa de cargas difusas com origem agrícola na bacia hidrográfica do rio degebe. *Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, v. 6, p. 135–146, 2003.
- DORNFELD, C. B. *Utilização de análises limnológicas, bioensaios de toxicidade e macroinvertebrados bentônicos para o diagnóstico ambiental do reservatório de Salto Grande (Americana, SP)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- DUGAN, H. A. et al. Hydrological and sediment yield response to summer rainfall in a small high Arctic watershed. *Hydrological Processes: An International Journal*, Wiley Online Library, v. 23, n. 10, p. 1514–1526, 2009.
- EAKIN, H. M. *Silting of reservoirs*. [S.l.]: US Government Printing Office, 1939.
- FILHO, L. V. d. S. *Qualidade e percepção ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Passaúna*. 5–9 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- FIOCK, L. R. Records of silt carried by the Rio Grande and its accumulation in Elephant Butte Reservoir. *Transactions American Geophysical Union*, Wiley Online Library, v. 15, n. 2, p. 468–473, 1934.
- FOSTER, G. C. et al. Meteorological and land use controls on past and present hydro-geomorphic processes in the pre-alpine environment: An integrated lake-catchment study at the Petit Lac d'Annecy, France. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 16, p. 3287–3305, 2003.
- GALVANI, F.; GAERTNER, E. Adequação da metodologia kjeldahl para determinação de nitrogênio total e proteína bruta. *Embrapa Pantanal-Circular Técnica (INFOTECA-E)*, Corumbá: Embrapa Pantanal, 2006.
- GARDNER, W. S. et al. Nitrogen dynamics in sandy freshwater sediments (saginaw bay, lake huron). *Journal of Great Lakes Research*, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 84–97, 2001.
- GILL, M. A. Sedimentation and Useful life of Reservoir. *Journal of Hydrology*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, n. 44, p. 89–95, 1979.
- GODOY, R. F. B. *Dinâmica da qualidade da água em reservatório de abastecimento público: estudo de caso do Passaúna -PR*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- GOYA, S. *Taxa de sedimentação atual na plataforma continental centro-norte do Embaio de São Paulo*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2011.



- LASHKARIPOUR, G. R. An investigation of groundwater condition by geoelectrical resistivity method: A case study in korin aquifer, southeast iran. *Journal of Spatial Hydrology*, v. 3, n. 2, 2003.
- LEITE, M. *Variação espacial e temporal da taxa de sedimentação no Reservatório de Salto Grande (Americana - SP) e sua influência sobre as características limnológicas do sistema*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 1998.
- LÓPEZ-TARAZÓN, J. A. et al. Suspended sediment, carbon and nitrogen transport in a regulated pyrenean river. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 540, p. 133–143, 2016.
- MAIA, A. G. *As Consequências do Assoreamento na Operação de Reservatórios Formado por Barragens*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006.
- MARCON, L. *High temporal resolution measurement of ebullition in a subtropical reservoir*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- MEGER, D. G. *Material particulado suspenso e macroconstituintes iônicos em um reservatório de abastecimento: o caso do rio Passaúna, Curitiba, Paraná, Brasil*. 55–63 p. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2007.
- MENDONÇA, R. et al. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs. *Nature Communications*, Springer US, v. 8, n. 1, p. 1–6, 2017.
- MICHALEC, B.; TARNAWSKI, M. Analysis of sediment deposit distribution in reservoir at krepna. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, v. 9, n. 4, 2006.
- MINEROPAR. *Atlas Geológico do Estado do Paraná*. Curitiba, 2001. 26–43 p. Disponível em: <<http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/MapasPDF/atlasgeo.pdf>>.
- MINHONI, R. T. de A.; BRITO, G. M.; AZEVEDO, R. F. de. Uso de ecobatímetro monofeixe na determinação da curva cota x área x volume do reservatório da pch pipoca–minas gerais–brasil. *IRRIGA*, v. 22, n. 1, p. 87–100, 2017.
- MOREIRA, S. R. D.; CAMPAGNOLI, F.; MAZZILLI, B. Datação de sedimentos do reservatório billings pelo método de pb-210. In: *V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa–VII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Porto Seguro, Bahia, Brasil*. [S.l.: s.n.], 1999.
- MORENO, Y. M.; RAMIREZ, J. J. Seston fluxes in the dam of a Colombian tropical reservoir. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 22, n. 3, p. 325–334, 2010.
- MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. [S.l.]: McGraw Hill Professional, 1998.
- MORTIMER, C. H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. *Journal of ecology*, JSTOR, v. 29, n. 2, p. 280–329, 1941.
- MUZZI, R. D.; EADIE, B. J. The Design and Performance of a Sequencing Sediment Trap for Lake Research. *Marine Technology Society Journal*, Marine Technology Society, v. 36, n. 2, p. 23–28, 2002.

- NETO, I. E. L.; ARAÚJO, J. C. d. Correntes de turbidez e implicações na sedimentação de reservatórios do semi-árido: proposta de arranjo experimental. In: *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.: s.n.], 2009.
- NOWLIN, W. H.; EVARTS, J. L.; VANNI, M. J. Release rates and potential fates of nitrogen and phosphorus from sediments in a eutrophic reservoir. *Freshwater Biology*, Wiley Online Library, v. 50, n. 2, p. 301–322, 2005.
- NÜRNBERG, G. K. Prediction of phosphorus release rates from total and reductant-soluble phosphorus in anoxic lake sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, NRC Research Press, v. 45, n. 3, p. 453–462, 1988.
- OLADOSU, S. O. et al. *An investigative study on the volume of sediment accumulation in Tagwai dam reservoir using bathymetric and geostatistical analysis techniques*. [S.l.]: Springer, 2019. v. 1. 492 p.
- PAIVA, J. B. D. d. *Avaliação dos Modelos Matemáticos de Cálculo de Transporte de Sedimentos em Rios*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Carlos, São Paulo, SP, 1988.
- PERRY, C.; TAYLOR, K. *Environmental sedimentology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- PONÇANO, W. L. et al. Metodologia para estudo de assoreamento de reservatório (III): roteiro para estudo de reservatórios no sul e sudeste brasileiro. In: *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*. [S.l.: s.n.], 1981. v. 3, p. 331–353.
- RAUEN, W. B.; CASTRO, C. d.; SILVA, M. G. da. Caracterização hidrossedimentológica do rio passauna, pr, brasil, a partir de dados históricos. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.: s.n.], 2017.
- RICH, J. J. et al. Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in chesapeake bay sediments. *Microbial Ecology*, Springer, v. 55, n. 2, p. 311–320, 2008.
- ROSA, F.; BLOESCH, J.; RATHKE, D. E. Sampling the settling and suspended particulate matter (spm). *Handbook of techniques for aquatic sediments sampling*. CRC, p. 97–129, 1994.
- SALAS, H. J.; MARTINO, P. *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. [S.l.]: CEPIS, 2001. 60 p.
- SALEH, M.; RABAH, M. Seabed sub-bottom sediment classification using parametric sub-bottom profiler. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 87–95, 2016.
- SANTOS, E.; CUNHA, A. Análise de Cenários Hidrossedimentométricos para Estimar Taxas de Assoreamento e Vida Útil do Reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP-Brasil. *Biota Amazônia*, v. 5, n. 3, p. 88–97, 2015.
- SAUNITI, R. M.; FERNANDES, L. A.; BITTECOURT, A. V. L. Estudo do assoreamento do reservatório da barragem do rio Passaúna - Curitiba ( PR). *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 54, p. 65–82, 2004.

- SCAPIN, J. *Caracterização do Transporte de Sedimentos em Pequeno Rio Urbano na Cidade de Santa Maria-RS*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- SCHIEFER, E. et al. Fluvial suspended sediment yields over hours to millennia in the High Arctic at proglacial Lake Linnévatnet, Svalbard. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 43, n. 2, p. 482–498, 2018.
- SCHILLEREFF, D. N. A review of in situ measurement techniques for investigating suspended sediment dynamics in lakes. *Geomorphological Techniques (Online Edition)*, v. 3, p. 7.1, 2015.
- SILVA, M. R. da et al. Distribuição de nutrientes em sedimentos fluviais do rio itajaí-açú, Blumenau, SC, Brasil. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Universidade de Taubaté, v. 5, n. 1, p. 102–113, 2010.
- SIMÕES, S. et al. Processos erosivos. *Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. ABRH, Porto Alegre, 2003.
- SMAHA, N.; GOBBI, M. Implementação de Um Modelo para Simular a Eutrofização do Reservatório do Passaúna-Curitiba-PR. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, p. 59–69, 2003.
- SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in ecology & evolution*, Elsevier, v. 24, n. 4, p. 201–207, 2009.
- SOBRINHO, T.; SONE, J.; AYACH, J. Avaliação de Métodos para a Estimativa da Deesarga Sólida Total em Rios. Bento Gonçalves, RS, Nov 2013.
- SOTIRI, K.; HILGERT, S.; FUCHS, S. Sediment classification in a Brazilian reservoir: Prons and cons of parametric low frequencies. *Advances in Oceanography and Limnology*, v. 10, n. 7953, p. 1–14, 2019.
- SOUZA, L. B. S. de; VILLELA, S. M.; SCHULZ, H. E. Simulação computacional do assoreamento em uma armadilha de sedimentos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 163–174, 2006.
- STORLAZZI, C. D.; FIELD, M. E.; BOTHNER, M. H. The use (and misuse) of sediment traps in coral reef environments: theory, observations, and suggested protocols. *Coral Reefs*, Springer, v. 30, p. 23–28, 2011.
- SUDERHSA. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba, 2002. 1–6 p. Disponível em: <[http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/pddrenagem/volume4/SUD0104RP{\\\_}WR121{\\\_}](http://www.aguasparana.pr.gov.br/arquivos/File/pddrenagem/volume4/SUD0104RP{\_}WR121{\_}>)>.
- THOMAS, S.; RIDD, P. Review of methods to measure short time scale sediment accumulation. *Marine Geology*, v. 207, p. 95–114, 2004.
- THORNTON, K.; KIMMEL, B.; PAYNE, F. Reservoir Limnology: ecological perspectives. In: . New York: [s.n.], 1990. v. 1, n. 1, p. 246.
- TUNDISI, J.; TUNDISI, T. Limnologia. São Paulo: Oficina de textos. 631 p. *Soils and Sediments*, v. 2, n. 4, p. 216–222, 2008.

- UWITEC. *Sediment Trap*. 2018. Disponível em: <[http://www.uwitec.at/html/sediment{\\\_}trap.h](http://www.uwitec.at/html/sediment{\_}trap.h)>.
- VANONI, V. Sedimentation Engineering. *Manual and Reports on Engineering Practice*, n. 54, 1977.
- WAGNER, A. *Event-Based Measurement and Mean Annual Flux Assessment of Suspended Sediment in Meso Scale Catchments*. Tese (Doutorado) — Ph. D. Thesis Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) Karlsruhe, 2020.
- WATT, A. *A Novel Method of Determining Sediment Transport using Ultrasonic Wireless Sensors*. Tese (Doutorado) — University of Wales Trinity Saint David, 2019.
- WATT, A. et al. Wireless sensor networks for monitoring underwater sediment transport. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 667, p. 160–165, 2019.
- WUNDERLICH, J.; WENDT, G.; MÜLLER, S. High-resolution echo-sounding and detection of embedded archaeological objects with nonlinear sub-bottom profilers. *Marine Geophysical Researches*, Springer, v. 26, n. 2-4, p. 123–133, 2005.
- YANG, C. T. Sediment transport: theory and practice. *Mcgraw-hill book co,(USA)*., 1996.
- ZANIN, P. R. *Modelagem Hidrossedimentológica De Bacia Hidrográfica Com Reservatórios*. 211 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

# APÊNDICE A – Eficiência de Retenção de Sedimentos no Reservatório Passaúna

## A.1 Método Simplificado de Colby

A descarga sólida total foi determinada usando a expressão

$$D_{ST} = D_{SS} + D_{SL}, \quad (\text{A.1})$$

onde  $D_{ST}$  é a descarga sólida total em t/dia,  $D_{SS}$  é a descarga sólida em suspensão e  $D_{SL}$  é a descarga sólida de fundo.

A descarga sólida em suspensão foi determinada com os dados de concentração de sólidos totais da estação fluviométrica de Campo Largo (Ponte BR -277 Campo Largo) do Instituto do Águas Paraná (65021800), que é a mais próxima do reservatório Passaúna, combinados com os dados de vazão de outra pesquisa do Projeto MuDak. Esta descarga foi obtida por

$$D_{SS} = (C_{ST} \cdot Q) \cdot 0,0864 \quad (\text{A.2})$$

onde  $D_{SS}$  é a descarga sólida em suspensão em t/dia,  $C_{ST}$  é a concentração dos sólidos totais em mg/L e  $Q$  a vazão em m<sup>3</sup>/s.

Por outro lado, para estimar a descarga de leito ou a descarga sólida de fundo, que não foi medida em campo, foi utilizado o método de Colby (1957), utilizando a expressão

$$D_{SL} = (39,84 \cdot V^{3,432} \cdot W \cdot K), \quad (\text{A.3})$$

onde  $D_{SL}$  é a descarga sólida de fundo em t/dia,  $V$  velocidade média do escoamento em m/s,  $W$  a largura da seção do canal em m e  $K$  o fator de correção.

O fator de correção do método de Colby é determinado pela concentração total de sólidos e a concentração relativa, apresentada na Equação A.4, que é determinada por

$$K = 1,19 \cdot \left( \frac{C_{ST}}{C_R} \right)^{0,47}, \quad (\text{A.4})$$

onde  $K$  é o fator de correção,  $C_{ST}$  é a concentração dos sólidos totais em mg/L e  $C_R$  é a concentração relativa de sólidos em mg/L.

A concentração relativa pode ser obtida a partir de

$$C_R = 10^b \cdot V^a, \quad (\text{A.5})$$

Tabela 12 – Valores de  $a$  e  $b$  para  $C_R$  em função da profundidade média. Fonte: (PAIVA, 1988 apud SCAPIN, 2005).

Profundidade (m)	a	b
< 0,35	1,8066	3,2627
0,35 a 0,45	1,8365	3,1760
0,45 a 0,55	1,9111	3,1139
0,55 a 0,65	1,9512	3,0881
0,65 a 0,75	1,9730	3,0512
0,75 a 0,85	1,9897	3,0212
0,85 a 0,95	1,8213	2,9289
0,95 a 1,10	2,0388	2,9692
1,10 a 1,30	1,9069	2,9002

onde,  $a$  e  $b$  são coeficientes apresentados na Tabela 12, em função da profundidade.

Então, com a curva-chave de sedimentos (Figura 28) estimou-se a descarga sólida total anual no reservatório Passaúna, utilizando a vazão da corrente principal ( $1,32 \text{ m}^3/\text{s}$ ), que resultou em  $4.165,56 \text{ t/ano}$  ( $11,41 \text{ t/dia}$ ).

## A.2 Método de Brune

Para determinar a eficiência da retenção de sedimentos, foi utilizado o Método Brune, determinando a capacidade de afluência por

$$C_{aff} = \frac{V_{res}}{V_{aff}}, \quad (\text{A.6})$$

onde  $C_{aff}$  é a capacidade de afluência,  $V_{res}$  é o volume do reservatório ( $58 \text{ hm}^3$ ) e  $V_{aff}$  é o volume afluente anual ( $4,16 \times 10^7 \text{ m}^3$ ). A  $C_{aff}$  encontrada foi de 1,39, com este resultado e com o diagrama de Brune apresentado na Figura 29, estimou-se a porcentagem de retenção que resultou em 97% de eficiência.

Com base na operação do reservatório, que mantém os sedimentos sempre ou quase sempre submersos e na curva de granulométrica, encontrada a partir dos núcleos (C3, C8 e C12) de sedimento (SOTIRI; HILGERT; FUCHS, 2019), na entrada da represa, – com 7,7% de areia, 46,15% de silte e 46,15% de argila – encontra-se o peso específico aparente do depósito, utilizando a média dos resultados das equações 2.6 e 2.7 ( $0,9 \text{ t/m}^3$ ). Por fim, estima-se o tempo de sedimentação, com base no volume mínimo de operação e com a idade do depósito de 30 anos, pela equação

$$T_b = \frac{V \cdot \gamma}{RE \cdot D_{ST}}, \quad (\text{A.7})$$

onde  $T_b$  é o tempo de sedimentação em anos,  $V$  é o volume mínimo de operação em  $\text{m}^3$ ,  $\gamma$  peso específico aparente do depósito em  $\text{t/m}^3$ ,  $RE$  é a eficiência de retenção e  $D_{ST}$  é a descarga sólida total em  $\text{t/ano}$ , estimada pelo método de Colby.



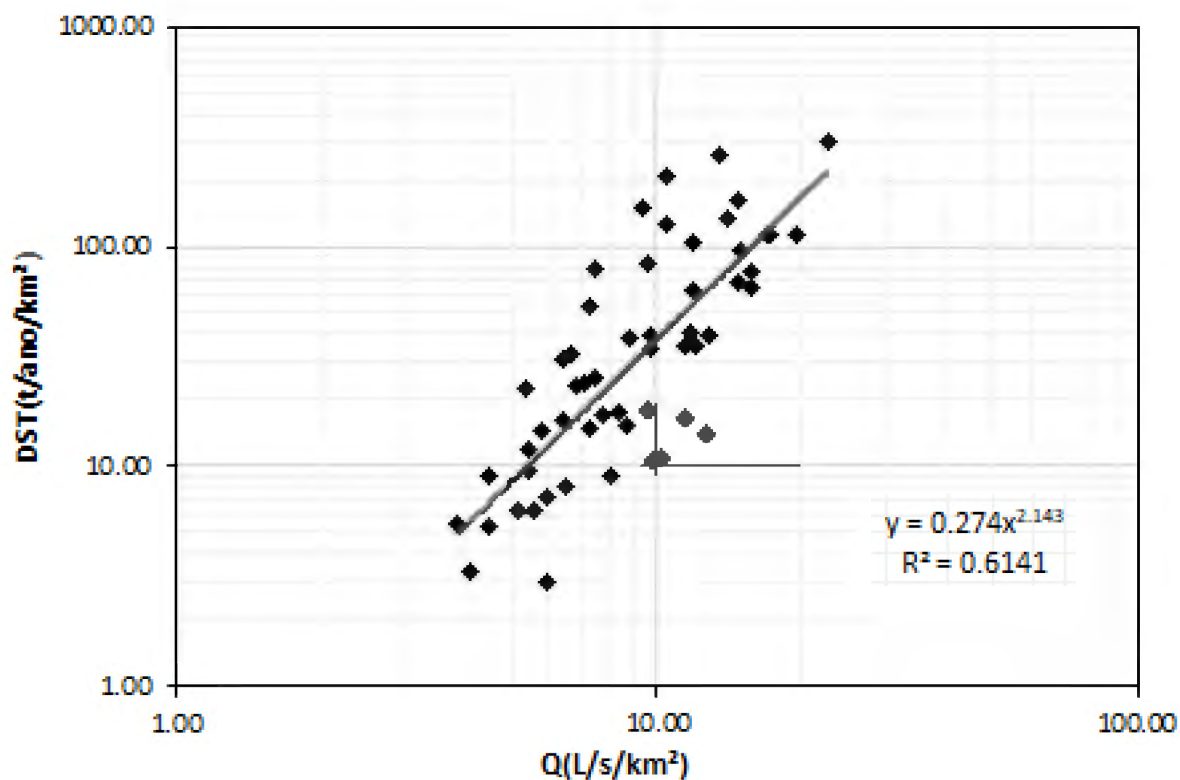


Figura 28 – Curva-chave de sedimentos do reservatório Passaúna.

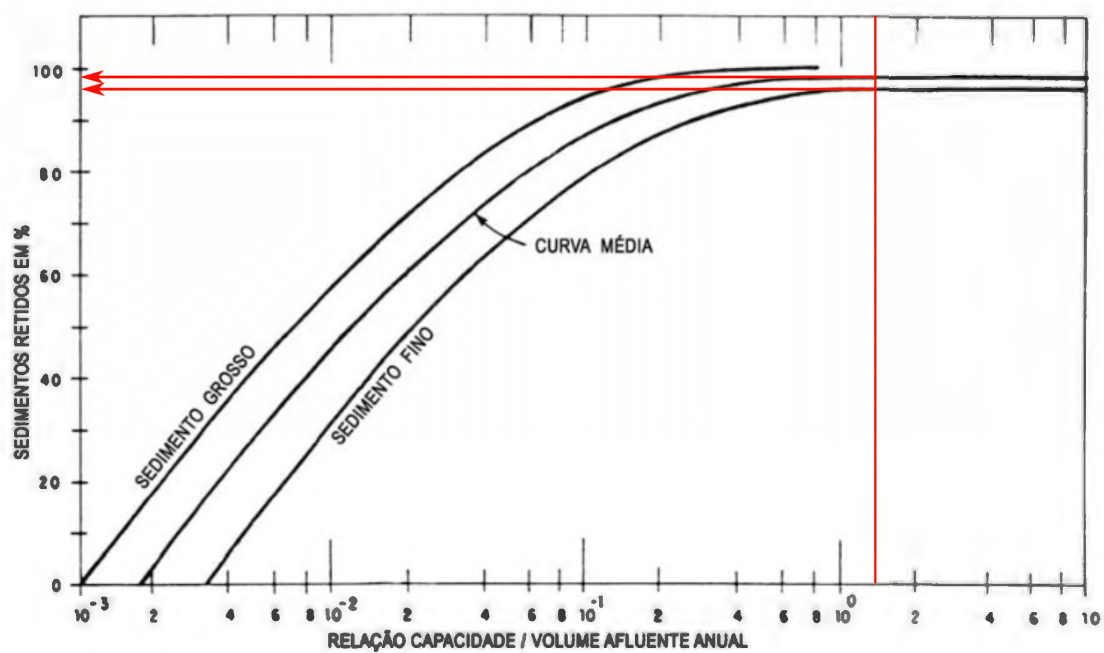


Figura 29 – Eficiência de retenção de sedimento do reservatório Passaúna, pelo método de Brune.

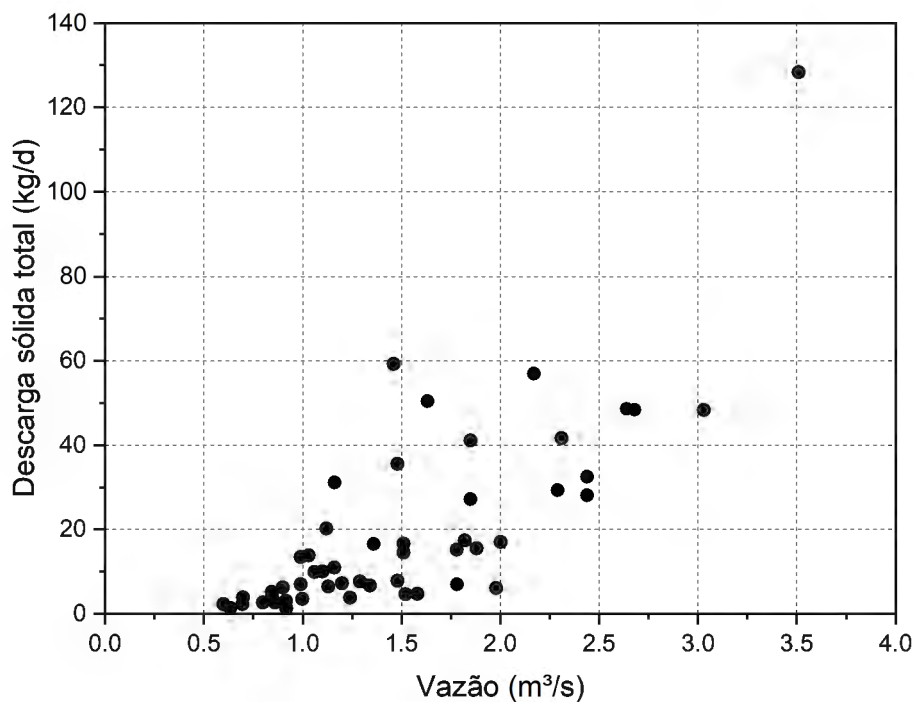


Figura 30 – Vazão do rio Passaúna pela descarga sólida total.

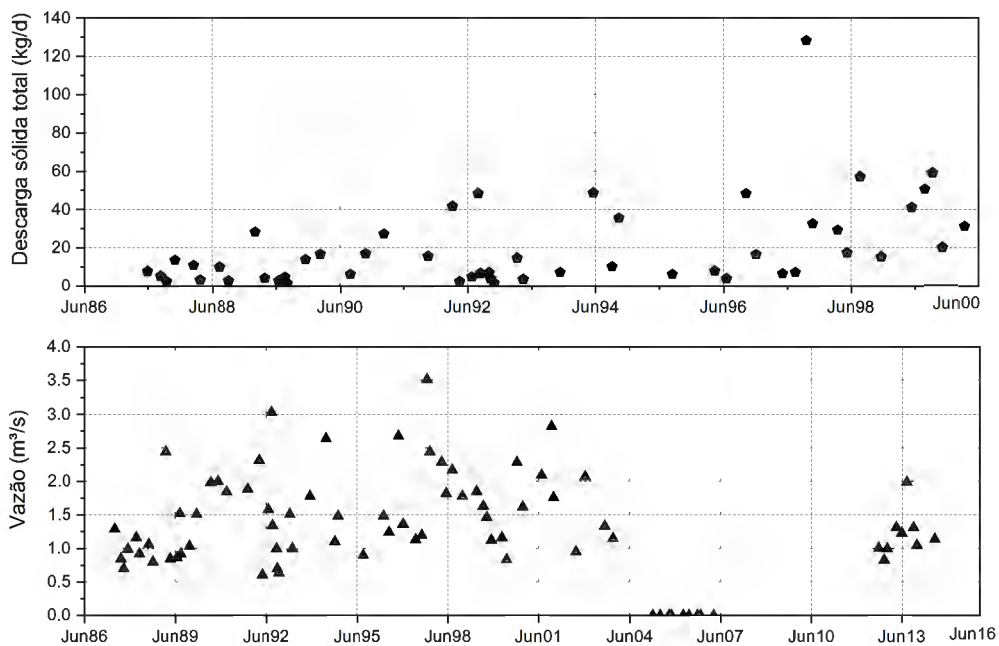


Figura 31 – Descarga sólida e vazão do rio Passaúna ao longo dos anos.