



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia

MICHELE DOS SANTOS LOPES CERQUEIRA

ANÁLISE DE FORMAÇÃO E COMPORTAMENTO DE PLUMAS DE
CONTAMINANTES EM UM CURSO D'ÁGUA NATURAL

ANALYSIS OF THE FORMATION AND BEHAVIOR OF CONTAMINAT
PLUMS IN A NATURAL WATERCOURSE

LIMEIRA
2022

MICHELE DOS SANTOS LOPES CERQUEIRA

ANÁLISE DE FORMAÇÃO E COMPORTAMENTO DE PLUMAS DE
CONTAMINANTES EM UM CURSO D'ÁGUA NATURAL

ANALYSIS OF THE FORMATION AND BEHAVIOR OF CONTAMINAT
PLUMS IN A NATURAL WATERCOURSE

*Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia
da Universidade Estadual de Campinas como
parte dos requisitos exigidos para a obtenção
do título de Doutora em Tecnologia, na Área
de Ambiente.*

Orientadora: Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro

Coorientadora: Elaine Cristina Catapani Poletti

Este exemplar corresponde à versão final da tese
pela aluna Michele dos Santos Lopes Cerqueira, e
orientada pela Prof.^a. Dr.^a Lubienska Cristina Lucas
Jaquiê Ribeiro

LIMEIRA

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

C335a Cerqueira, Michele dos Santos Lopes, 1990-
Análise de formação e comportamento de plumas de contaminantes em curso d'água natural / Michele dos Santos Lopes Cerqueira. – Limeira, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro.
Coorientador: Elaine Cristina Catapani Poletti.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Água - Qualidade. 2. Coeficiente de dispersão. 3. Modelagem matemática. I. Ribeiro, Lubienska Cristina Lucas Jaquiê, 1977-. II. Poletti, Elaine Cristina Catapani, 1975-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Analysis of the formation and behavior of contaminant plums in a natural watercourse

Palavras-chave em inglês:

Water quality

Dispersion coefficient

Mathematical modeling

Área de concentração: Ambiente

Titulação: Doutora em Tecnologia

Banca examinadora:

Lubienska Cristina Lucas Jaquiê Ribeiro [Orientador]

Roberta Regina Delboni

Mauro Menzori

Eva Caroline Martins Oliveira

Erich Kellner

Data de defesa: 16-12-2022

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8607-4585>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7250431398240679>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa da tese para o Título de Doutora em Tecnologia na área de concentração de Ambiente, a que submeteu a aluna Michele dos Santos Lopes Cerqueira, em 16 de dezembro de 2022 na Faculdade de Tecnologia – FT/UNICAMP, em Limeira/SP.

Profa. Dra. Lubienska Cristina Lucas Jaquie

Prof. Dr. Erich Kellner

Profa. Dra. Roberta Regina Delboni

Prof. Dr. Mauro Menzori

Profa. Dra. Eva Carolline Martins Oliveira

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da FT, pelo código de autenticidade deste documento na página www.dac.unicamp.br
Código: 94e0b19159acbf3454f586c486f6efd0001e28ca

A minha família, que além de depositar amor, confiança e paciência, embarcou comigo nessa caminhada ao conhecimento.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Grata a Deus, pela vida e oportunidade de realizar mais um sonho.

Aos meus pais, Joel e Celina, meus maiores exemplos. Obrigada pelo incentivo, orientações e principalmente pelas orações em meu favor.

A meu marido, Luis Augusto, pela paciência, parceria e apoio. Obrigada por tornar o caminho mais leve.

A minha filha, Manuela, que com certeza me mostrou a importância de ver a vida através de seus olhos.

Aos meus irmãos, Rafael e Ellen, por comemorarem cada vitória minha como se fossem de vocês.

Aos meus amados afilhados, Cauã e Beatriz, por serem minha fonte de energia.

A minha orientadora, Professora Lubienska, que com muita paciência acreditou no meu potencial, e sempre me depositou carinho.

A minha coorientadora, Professora Elaine, pela contribuição significativa, e por acreditar que eu sempre podia mais.

Ao Professor Mauro, por toda a ajuda, dedicação e acima de tudo carinho, por mim e pelo trabalho realizado.

Aos professores da banca, por todo apoio, sugestão e carinho com meu trabalho.

A Secretaria de Meio Ambiente de Limeira, por toda disposição e parceria.

Aos Professores, Marcos Gonçalves e Edson Ursini, por agregarem positivamente na minha formação acadêmica.

A grande parceira de laboratório, Camila Melchior, pelos estudos, brincadeiras e amizade.

Aos colegas de pesquisa, pela união e incentivo. Obrigada por transformar dias cansativos em momentos históricos.

Aos alunos que me ajudaram nas coletas e análises.

E por fim, a todos que contribuíram para a conclusão dessa etapa, e com isso formar a Michele que sou hoje.

RESUMO

Dada a devida importância aos recursos hídricos e aos problemas decorrentes do comprometimento da qualidade destes bens naturais, em termos de estado e quantidade de recurso, além de transformações climáticas e ambientais, a busca pelo equilíbrio e pelo gerenciamento destas reservas de água aumenta. Desta forma, entendimentos acerca da formação de plumas de poluentes e de seu comportamento dispersivo em corpo d'água natural pode favorecer melhores compreensões sobre fluxo e decomposição dos compostos presentes nos despejos que muito poluem os bens aquáticos. É dentro desse contexto que esta pesquisa se situa, cujo objetivo volta-se para o estudo da formação e do comportamento da pluma de um traçador em meio hídrico, na Bacia do Ribeirão Pinhal, Limeira/SP. Para tanto, utilizou-se de modelagem matemática e simulação computacional pautados em medições realizadas em campo e análises estatísticas multivariadas. Através dos experimentos, e do estudo de correlação, constatou-se que a vazão tem maior peso quando se trata do estudo da dispersão longitudinal, além disso, o estudo e o monitoramento *in loco* do comportamento das plumas de contaminantes auxiliaram o desenvolvimento da modelagem matemática, e é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas. que possibilitou cálculos de concentrações e análises mais refinadas sobre comportamento do trecho da bacia estudada.

Palavras-chave: Qualidade da água, Coeficiente de dispersão, Modelagem matemática.

ABSTRACT

Given the due importance of water resources and the problems arising from the compromising of the quality of these natural assets, in terms of state and quantity of resources, as well as climatic and environmental transformations, the search for balance and management of these water reserves increases. Thus, understanding the formation of pollutant plumes and their dispersive behavior in natural water bodies can provide a better understanding of the flow and decomposition of the compounds present in the discharges that pollute aquatic environments. It is within this context that this research is situated, whose objective is to study the formation and behavior of a tracer plume in the water environment, in the basin of Ribeirão Pinhal, Limeira/SP. To this end, it was used mathematical modeling and computer simulation based on field measurements and multivariate statistical analysis. Through the experiments, and the correlation study, it was found that the flow has greater weight when it comes to the study of longitudinal dispersion, in addition, the study and monitoring of the behavior of the plumes of contaminants in loco helped the development of mathematical modeling, and is used in only two of the fifteen equations studied. which enabled calculations of concentrations and more refined analysis on the behavior of the stretch of the basin studied.

Key-words: Water quality, dispersion coefficient, mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo de lançamento de poluente em curso d'água	20
Figura 2 - Mudanças dos Perfis de Concentração	21
Figura 3 - Influência neurônio vencedor	29
Figura 4 - Exemplo do mapa de saída do SOM	29
Figura 5 - Gráfico PCA	31
Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Pinhal	37
Figura 7 - Limite e áreas das sub-bacias do Ribeirão Pinhal	38
Figura 8 - Denominação longitudinal de monitoramento.	41
Figura 9 - Denominação transversal de monitoramento.	42
Figura 10 - Protótipo do coletor.	43
Figura 11 - Sistema base para as coletas, onde y é a altura da lâmina d'água.	44
Figura 12 - Esquematização do sistema de despejo	45
Figura 13 - Logística do despejo	46
Figura 14 - Curva de Calibração Cloreto de Sódio	47
Figura 15 - Representação do Modelo de Equações de Diferenças	48
Figura 16 - Exemplificação do cálculo de volume	49
Figura 17 - Área de Estudo Google Earth	52
Figura 18 - Área de Estudo	53
Figura 19 - Planta representativa da confluência entre o córrego e o rio.	54
Figura 20 - Topografia do curso d'água: (a) sem cotas e (b) com cotas	55
Figura 21 - Visão dos pontos de monitoramento	56
Figura 22 - Levantamento Topográfico do Compartimento 1	57
Figura 23 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 2 (a), 3 (b) e 4 (c).	59
Figura 24 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d)	61
Figura 25 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 9 (a), 10 (b) e 11 (c)	63
Figura 26 - Perfil de velocidade em todos os compartimentos	65
Figura 27 - Comportamento da Velocidade nas Regiões Direita, Centro e Esquerda	66
Figura 28 - Comportamento da Velocidade nos níveis de profundidade	66
Figura 29 - Coletores: (a) coletores (b) seringas (c) puxador	67

Figura 30 - Coleta: (a) compartimento 3 (b) entrega da amostra	68
Figura 31 - Coletores Universais identificados	69
Figura 32 - Comportamento das Concentrações nas Regiões Monitoradas: (a) esquerda, (b) centro, (c) direita, (d) superfície	70
Figura 33 - Comportamento da Concentração Resultante	71
Figura 34 - Formação das plumas: (a) 20% (b) 60% (c) 80%	73
Figura 35 - Formação da Pluma nas Regiões de Monitoramento	75
Figura 36 - Imagens da Filmagem do despejo do contaminante	76
Figura 37 - Concentrações e Decaimentos	79
Figura 38 - Comportamento da Concentração: Simulação	81
Figura 39 - Comportamento da Concentração: (a) Simulada (b) Coletada	82
Figura 40 - Análise de autovalores	84
Figura 41 - Porcentagem de Variância	85
Figura 42 - Gráfico de autovalores	85
Figura 43 - gráfico PC1 x PC2	86
Figura 44 - gráfico PC1 x PC3	87
Figura 45 - Gráfico de correlação	87
Figura 46 - Gráficos de correlação dos PCs	88
Figura 47 - Gráficos de correlação dos PCs	89
Figura 48 - Mapas auto organizáveis: Malha de 4 dimensões	90
Figura 49 - Mapas auto organizáveis: Malha de 6 dimensões	91
Figura 50 - Mapas auto organizáveis: Malha de 8 dimensões	92
Figura 51 - Mapas auto organizáveis: Malha de 10 dimensões	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos indiretos para levantamento do coeficiente de dispersão longitudinal. _____	23
Quadro 2 - Evolução dos Modelos Matemáticos de Qualidade de Água _____	26
Quadro 3 - Tipos de abordagem nos modelos matemáticos _____	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lâmina d'água do Compartimento 1 _____	57
Tabela 2 - Lâmina d'água dos Compartimentos 2, 3 e 4. _____	60
Tabela 3 - Lâmina d'água dos Compartimentos 5, 6, 7 e 8 _____	62
Tabela 4 - Lâmina d'água dos Compartimento 9, 10 e 11 _____	64
Tabela 5 - Concentração Resultante de NaCl _____	69
Tabela 6 - Comprimento advectivo _____	76
Tabela 7 - Volume e Fluxo dos Compartimentos _____	77
Tabela 8 - Decaimento por Compartimento _____	78
Tabela 9 - Coeficientes de Dispersão _____	83
Tabela 10 - Resumo da Variância _____	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	17
2	OBJETIVO	18
2.1	Objetivos Gerais	18
2.2	Objetivos Específicos	18
3	APRESENTAÇÃO DA TESE	19
	CAPÍTULO I - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
1.	LANÇAMENTO DE CONTAMINANTE EM CORPO D'ÁGUA	20
2.	MODELAGEM MATEMÁTICA	25
3.	ESTUDO DA CORRELAÇÃO	27
3.1	Mapa Auto Organizável	28
3.2	Análise de Componentes Principais	30
	CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
1.	MODELAGEM MATEMÁTICA E COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL	32
2.	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E MAPAS AUTO ORGANIZÁVEIS	34
	CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	37
1.	ÁREA DE ESTUDO	37
2.	LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	38
3.	CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA	40
4.	DETERMINAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DE MONITORAMENTO	41
5.	MONTAGEM DOS COLETORES	42
6.	COLETAS	44
7.	ANÁLISE DAS AMOSTRAS	46
8.	MODELAGEM MATEMÁTICA	47
8.1	Os parâmetros da equação	49
9.	ESTUDO DE CORRELAÇÕES	50
	CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
1.	ÁREA DE ESTUDO	52
1.1	Levantamento Topográfico	54
1.2	Perfil de Velocidade	64
2.	COLETAS	67

3. FORMAÇÃO DA PLUMA	72
4. MODELAGEM MATEMÁTICA.....	77
4.1 Mensuração dos parâmetros.....	77
Continuação Tabela 7.....	78
4.1.1 Cálculo do decaimento	78
4.2 A Modelagem matemática.....	80
Considerando os canais à direita (D), central (C) e à esquerda (E), a formulação matemática é dada pelo seguinte sistema (Equação 27):.....	80
5 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO	83
5.1 Análise de PCA.....	83
5.2 Análise de SOM	90
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

A gestão das águas no Brasil desenvolveu-se, durante muito tempo, de forma fragmentada em função de setores como energia elétrica, agricultura irrigada, saneamento, entre outras, com planejamento e medidas individuais, centralizadas em decorrência dos governos estaduais e federal com política sem, ou pouca, participação de governos municipais, usuários da água e sociedade civil. Durante a década de 80, ocorreram discussões intensas sobre a necessidade de mudar esse cenário ao propor a criação de um sistema integrado e descentralizado de gestão. Em decorrência do resultado das discussões e das propostas, um novo modelo de gestão passou a existir, de forma descentralizada, para o nível de bacia hidrográfica contando com as seguintes medidas: integração de todas as políticas setoriais envolvidas na gestão da água; envolvimento dos usuários da água e da sociedade civil no processo decisório; tratamento da água como um bem de valor econômico e não mais como uma dádiva inesgotável da natureza (ARBES e JORGE, 2005).

Nesse mesmo período ocorreu um grande avanço da urbanização que proporcionou um aumento não só da demanda, mas também do impacto das cidades no ambiente hídrico local, sendo uma época marcada pelo aproveitamento do uso do solo urbano e da geração de resíduos (PEIXOTO, STUART e CAMPOS, 2016).

Desta forma, a intensificação das atividades antrópicas, pelo crescimento desordenado, tanto industrial como urbano, pode ser notada na contaminação do ar, água e solo. Essas atividades frequentemente geram efluentes e os cursos d'água passam a ser utilizados para diluir e transportar seus resíduos.

Conforme divulgado pelo Atlas de Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA, 2017), diariamente no Brasil são geradas 9,1 mil toneladas de carga orgânica e apenas 39% desse montante é tratado, antes de ser lançado em corpos d'água. O restante pode atingir cursos d'água naturais, já que apenas 30% dos municípios brasileiros possuem estação de tratamento de esgoto.

O grau de poluição das águas é medido através de características físicas, químicas e biológicas das impurezas existentes que são identificadas por parâmetros de qualidade (PEREIRA, 2004). Outro indicador, que está relacionado ao

comportamento de plumas de poluentes na água, é o Coeficiente de Dispersão Longitudinal, que representa a capacidade que o corpo receptor tem em dispersar poluentes (FAN, BRAVO e COLLISCHONN, 2016; DEVENS, BARBOSA JÚNIOR e SILVA, 2010; MACHADO et al., 2007).

A capacidade de um curso d'água para dispersar poluentes, bem como seu comportamento neste processo, é de importante conhecimento para se compatibilizar condições de lançamentos de efluente e controle de qualidade da água, visando atender às disposições presentes no CONAMA nº357/2005 e suas atualizações, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como condições e padrões de lançamentos de efluentes (OLIVEIRA, 2013). Além disso, é importante atender aos padrões de potabilidade da água para consumo humano disponíveis na Portaria de Consolidação nº5/2017, no qual o anexo 20 que trata dos padrões de potabilidade.

O entendimento de formação de plumas de poluentes pode auxiliar estudos e contribuir para estratégias de recuperação e cuidados para com o meio, e é dentro desse contexto que este estudo se situa, com o objetivo de quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal para, com uso das técnicas de correlação, apontar a(s) variável(eis) de maior interferência no coeficiente estudado e analisar a formação e o comportamento da pluma de um traçador, usado para simular o comportamento de um contaminante. Para tanto, análises empíricas, através de experimentações na Bacia do Ribeirão Pinhal, Limeira, São Paulo/Brasil, foram realizadas com o intuito de desenvolvimento de modelagem matemática sobre o comportamento evolutivo de concentrações de contaminantes.

Pesquisas de campo, com o intuito de entender o comportamento de fluxo do curso d'água natural e a formação da pluma, são dispendiosas, requerem tempo, estudo, equipe de trabalho, equipamento de segurança, monitoramento e coleta, além de conhecimentos sobre o assunto e sobre o local, considerando dificuldades de implementação de metodologias assertivas, devido às incertezas e as variações múltiplas que podem ocorrer. São poucos os estudos que utilizaram cursos naturais para compreender o comportamento da dispersão de um poluente (SILVA, JUNIOR e

PEREIRA, 2018; SILVA, PECLY e AZEVEDO, 2017; VIDAL, CHAGAS e SOUZA, 2015 e ZENG e HUAI, 2014).

No tocante à modelagem matemática e simulação de fluxos dos contaminantes, são necessários recursos como: conhecimento teórico sobre o assunto a ser estudado, habilidades em programação, acesso à softwares e computadores, entre outros. A modelagem pode auxiliar o entendimento de fenômenos e, assim, contribuir com o gerenciamento de questões importantes no tocante à qualidade da água e dos recursos (KROEZE et al., 2016).

Sabe-se que é de longa data os estudos teóricos e de campo sobre a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal (CUNHA e FERREIRA, 2019; LOPES, 2016; SOARES, PINHEIRO e ZUCCO, 2013; DEVENS, BARBOSA JÚNIOR e SILVA, 2010), não existindo um método único capaz de estimar o coeficiente para diversas condições hidráulicas e geométricas. Verificar quais são as características geométricas e físicas envolvidas e como elas se relacionam nas formulações é uma tarefa pertinente diante de resultados tão diferentes. Sendo assim, é de fundamental importância estudos que colaborem neste sentido e esta pesquisa busca fazer uma contribuição.

1.1 Motivação

A motivação para esta pesquisa está na manutenção da qualidade dos recursos hídricos, já que a água é indispensável para todos os seres vivos. Com isso, a importância de ações voltadas para a preservação deste bem mineral, ou seja, estudos do impacto ao meio ambiente e monitoramento da qualidade da água, são técnicas importantes no processo de tomada de decisões.

Identificar de forma aproximada como um corpo d'água natural se comporta ao receber uma carga poluidora e o comportamento da pluma do contaminante são verificações necessárias para um diagnóstico ambiental.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivos Gerais

A presente tese tem como objetivo quantificar o coeficiente de dispersão longitudinal e identificar as variáveis de maior interferência no coeficiente, além de analisar a formação e o comportamento de plumas de contaminantes em um curso d'água natural, no município de Limeira, interior de São Paulo/Brasil, de forma a considerar as variáveis geométricas e hidrodinâmicas do corpo d'água, e determinar via modelagem matemática, as concentrações evolutivas no tempo de poluentes, levando em consideração o comportamento dispersivo do rio.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterização do curso d'água estudado, com levantamento e medições hidráulicas e geográficas e desenvolvimento de batimetria local;
- Aprimoramento da metodologia desenvolvida por Lopes (2016) para garantia de eficiência no ensaio de estímulo-resposta com injeção de traçador;
- Quantificação do coeficiente de dispersão longitudinal experimentalmente;
- Análise da correlação entre as características geométricas, físicas com o coeficiente de dispersão, através do SOM e PCA;
- Identificação de variáveis de maior interferência no coeficiente de dispersão;
- Desenvolvimento de modelagem matemática para análise da concentração de poluentes, via um sistema de equações de diferenças, tal como disposto em Alves (2009) e Montovani (2012);
- Realização de implementação computacional para simulações do comportamento de plumas de poluentes no meio com base no espalhamento do traçador obtido experimentalmente;

3 APRESENTAÇÃO DA TESE

Esta tese foi dividida em 5 capítulos.

No Capítulo I é abordada a fundamentação teórica, onde são apresentados conceitos teóricos e práticos que auxiliaram no desenvolvimento da tese.

O Capítulo II traz a revisão bibliográfica que expõe trabalhos relevantes ao tema central da pesquisa.

No Capítulo III são expostos os materiais e métodos utilizados, bem como a coleta de dados de campo realizada.

Já no Capítulo IV, os resultados apresentados referem-se a toda caracterização topográfica e hidráulica do corpo d'água estudado, bem como as coletas para as análises de correlação e modelagem matemática, sendo esses seguidos de análises e discussão.

Por fim, o Capítulo V apresenta as considerações finais e exhibe as principais conclusões da correlação e modelagem apresentados no capítulo IV.

CAPÍTULO I - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

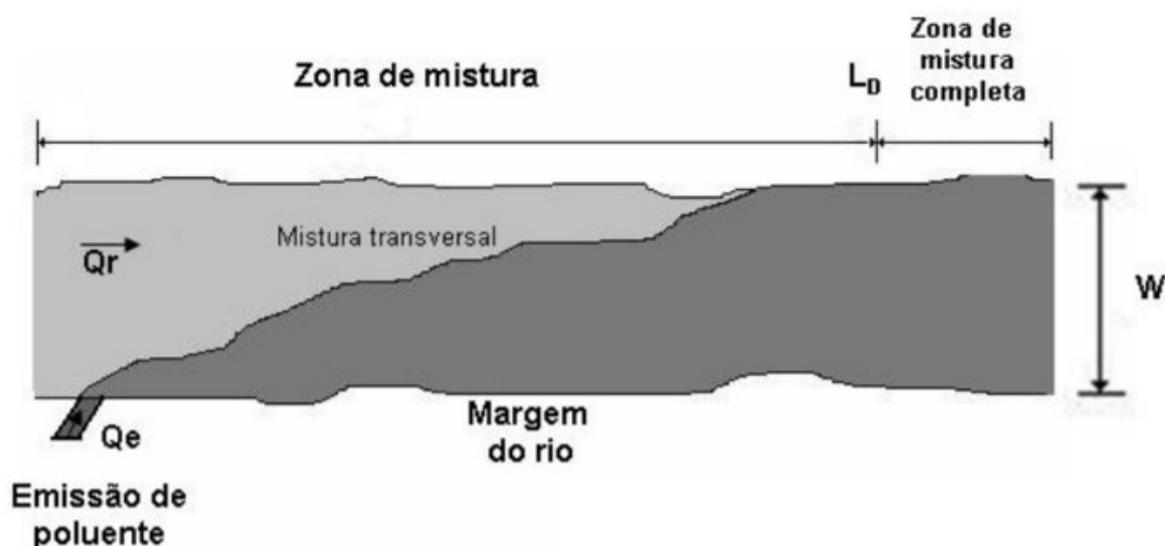
1. LANÇAMENTO DE CONTAMINANTE EM CORPO D'ÁGUA

Diante de tantas fontes de contaminação o controle da poluição em cursos d'água natural torna-se necessário para alcançar a sustentabilidade (GARCIA, et al. 2014) de maneira que seja possível conhecer e entender como esses poluentes se comportam, já que esse conhecimento pode auxiliar na tomada de decisões e monitoramento da qualidade das águas dos rios, pois grande parte da disposição de resíduos gerados pela atividade humana estão em rios.

As fontes de contaminação em um corpo d'água podem ser pontuais (aterros sanitários, lançamento de esgoto doméstico, efluentes industriais) e difusas (agrotóxicos, contaminação por áreas agrícolas).

Na Figura 1 é possível verificar um esquema representativo de um lançamento de contaminante em um curso d'água.

Figura 1 - Esquema representativo de lançamento de poluente em curso d'água

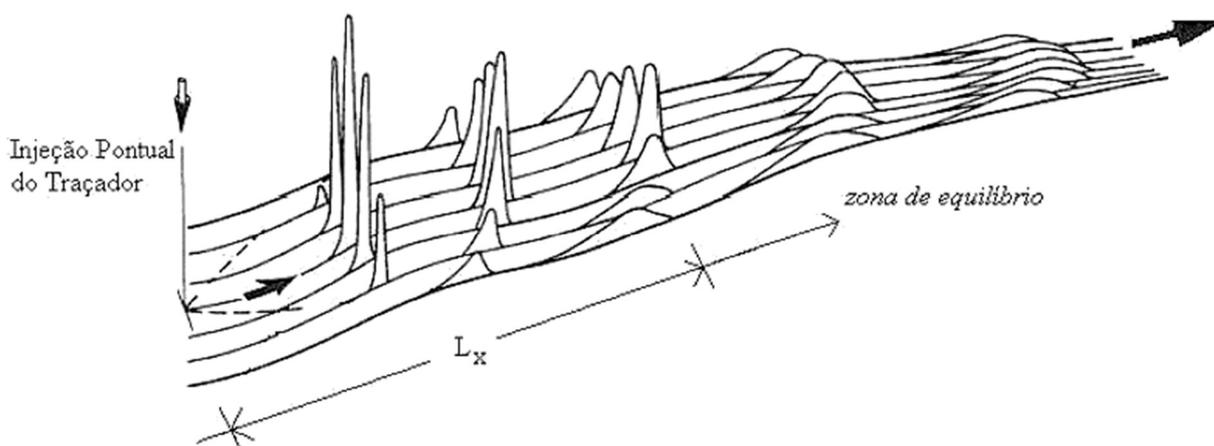


Fonte: (MACHADO, 2006)

Pode-se verificar que o efluente é lançado na lateral do rio com uma vazão de entrada de efluente Q_e , constante, e escoa à uma vazão também constante Q_r , que é vazão do rio. À medida que o efluente percorre o leito do rio, uma pluma vai se formando e se expandindo ao longo da zona de mistura, com comprimento (L_d), até atingir uma zona de mistura completa, onde não há mais dispersão significativa. A partir desse ponto, apenas as reações de decomposição das substâncias em estudo, caso seja um componente degenerativo, devem ser levadas em consideração (MACHADO, 2006).

Na Figura 2 é possível visualizar o desenvolver dos perfis de concentração do efluente, a partir de um despejo pontual e contínuo ao longo da zona de mistura, ou seja, a variação da concentração em relação a distância do ponto de despejo. Na primeira zona (antes do despejo), a água deve apresentar seus padrões de qualidade conciliáveis com seus vários tipos de uso, já, na segunda zona (depois do despejo), medidas devem ser tomadas para melhorar a qualidade da água.

Figura 2 - Mudanças dos Perfis de Concentração



Fonte: (DEVENS, 2006)

Visto que a dispersão do poluente pode ocorrer em um corpo d'água, a Portaria de Consolidação (nº 5/2017), que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, foi criada pelo Ministério da Saúde. No tocante às Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), elas regem as condições de

lançamento de um efluente em corpos d'água - Resolução nº357/2005 e suas revisões.

De acordo com Devens et al. (2010), o parâmetro coeficiente de dispersão informa a capacidade que o curso d'água tem para dispersar poluentes, ou seja, esse é um dos parâmetros que tem um significado especial nas análises da qualidade da água. Conhecer a capacidade do curso d'água em dispersar poluentes é essencial para controlar a qualidade da água. Ribeiro et al. (2007) acrescenta dizendo que essa capacidade é importante no prévio planejamento de medidas que irão minimizar o impacto causado pelos despejos, evitando risco à saúde pública e atividades que dependem diretamente do uso da água.

O estudo da dispersão, de acordo com Bertolleti (2013), deve conduzir ao conhecimento da diluição do corpo receptor, estabelecendo a zona de mistura e o controle ecotoxicológico ou químico de um efluente, ou seja, compreender o fluxo, a dispersão e a decomposição dos compostos presentes nos efluentes lançados em canais naturais é de extrema importância para a solução de vários problemas presentes no despejo de efluente em rios. Entre estes problemas destacam-se a escolha do melhor ponto de emissão de um efluente, a determinação da distância necessária para a dispersão e a distância para que ocorra a degradação das substâncias biodegradáveis.

Sendo assim, a obtenção desse coeficiente é uma etapa significativa destes estudos e para isso são usados dois métodos: método direto e método indireto. Os métodos diretos são baseados no tratamento matemático das distribuições temporais da concentração (geradas por um traçador artificial).

Os métodos indiretos que são baseados na quantificação de variáveis físicas e geométricas do curso d'água, têm facilidade de coleta e disponibilidade dessas variáveis. Com isso, nessa pesquisa optou-se por usar os métodos indiretos (Quadro 1) já que são de mais fácil acesso e aplicabilidade.

Quadro 1 - Métodos indiretos para levantamento do coeficiente de dispersão longitudinal.

AUTOR	EQUAÇÃO	
Elder (1959)	$\frac{E_L}{u^* \cdot H} = \alpha E$	Equação 1
McQuivey & Keefer (1974)	$E_L = 0,058 \frac{Q}{S \cdot B}$	Equação 2
Fischer (1975)	$E_L = 0,011 \frac{U^2 \cdot B^2}{u^* \cdot H}$	Equação 3
Liu (1977)	$E_L = \beta L \cdot \frac{Q^2}{u^* \cdot R h^3 \cdot H}$	Equação 4
Beltaos (1980)	$E_L = 1,14 \beta B \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{u^* \cdot H}$	Equação 5
Nikora & Sukhodolov (1993)	$\frac{E_L}{U \cdot B} = \alpha NS$	Equação 6
Híbrido de Vargas & Mellado (1994)	$E_L = \beta VM \cdot \frac{U^2 \cdot B^2}{u^* \cdot H}$	Equação 7
Seo & Cheong (1998)	$\frac{E_L}{H \cdot u^*} = 5,915 \left(\frac{B}{H}\right)^{0,620} \cdot \left(\frac{U}{u^*}\right)^{1,428}$	Equação 8
Koussis & Rodrigues-Mirasol (1998)	$E_L = \varphi \frac{u^* \cdot B}{H}$	Equação 9
Deng et. Al (2001)	$\frac{E_L}{u^* \cdot H} = \frac{0,15}{8 \cdot \epsilon t o} \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^{5/3} \cdot \left(\frac{U}{u^*}\right)^2$	Equação 10
Kashefipour & Falconer (2002)	$E_L = 10,612 \cdot H \cdot U \cdot \left(\frac{U}{u^*}\right)$, para $B/H > 50$	Equação 11
	$E_L = \left[7,428 + 1,775 \cdot \left(\frac{B}{H}\right)^{0,62} \cdot \left(\frac{u^*}{U}\right)^{0,572} \right] \cdot H \cdot U \cdot \left(\frac{U}{u^*}\right)$, para $B/H < 50$	Equação 12
Devens et al. (2006)	$E_L = 3,772 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{U^{-0,793} \cdot B^{0,739}}{u^{*0,052} \cdot H^{1,5842}}\right)$	Equação 13
Ribeiro et al. (2010)	$E_L = 7,326 \cdot u^{*0,303} \cdot H^{1,316} \cdot B^{0,445} \cdot U^{1,458}$	Equação 14

Continuação Quadro 1

AUTOR	EQUAÇÃO		
Devens et. Al. (2010)	$E_L = 0,729 \cdot U^{0,774} \cdot B^{1,031} \cdot S^{0,036} \cdot H^{-0,151}$		Equação 15
Oliveira (2013)	$E_L = 0,744 \left(\frac{H^{0,0361} \cdot U^{1,591}}{u_*^{2,216} \cdot B^{0,661}} \right)$		Equação 16
Legenda			
<p>E_L = coeficiente de dispersão longitudinal</p> <p>H = profundidade média do escoamento [L]</p> <p>u_* = velocidade de atrito ou de cisalhamento [L T⁻¹]</p> <p>S = declividade da linha de energia [L L⁻¹]</p>	<p>$\alpha E = 5,93$</p> <p>Liu definiu: $0,001 \leq \beta L \leq 0,06$</p> <p>$\beta B$ = parâmetro correlacionado com u^*/U</p> <p>βVM = coeficiente em função do fator B/R_H</p> <p>$\alpha NS = 1,1$</p> <p>$\phi = 0,6$</p> <p>$\epsilon \sigma$ = coeficiente de mistura transversal [L² T⁻¹]</p>	<p>B = largura à superfície livre da água [L]</p> <p>Q = vazão [L³ T⁻¹]</p> <p>U = velocidade média do escoamento [L T⁻¹]</p> <p>R_H = raio hidráulico [L]</p>	

Fonte: Acervo do Autor.

Estratégias de planejamento e gestão de bacias hidrográficas requerem o conhecimento da qualidade de água e ocupação dos rios para que possam ser projetados cenários futuros, estudo da demanda de água e até possíveis consequências das mudanças climáticas (TUNDISI, MATSUMURA-TUNDISI e PARESCHI, 2008).

De uma forma geral, conhecer e poder mensurar parâmetros de qualidade de água facilita no monitoramento dos corpos d'água. O uso de ferramentas que empregam modelos de qualidade de água ajuda nesse gerenciamento, ainda mais quando o modelo conta com as variáveis geométricas e hidrodinâmicas que são relevantes no que se refere ao transporte de contaminantes.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos matemáticos quando bem modelados e empregados podem ser usados em previsões de impactos ambientais e possuem uma importância como ferramenta de apoio no controle e acesso a sustentabilidade.

A modelagem matemática é uma ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos, podendo subsidiar a implementação de diversos instrumentos definidos pela Política Nacional, incluindo os Planos de Bacia Hidrográfica, o enquadramento dos cursos d'água em classes preponderantes de uso, a outorga dos direitos de uso, a cobrança pelo uso da água e o rateio de custos das obras implantadas nas respectivas bacias (JESUS, 2006, p.3).

Analisar o transporte de massa de um curso d'água relacionando-o com a geometria do rio, a vazão de descarga do efluente e demais variáveis hidrodinâmicas do corpo d'água, como velocidade e vazão, é um processo importante no âmbito da sustentabilidade, contudo pode ser um procedimento caro e dispendioso, em virtude das alterações diversas que podem ocorrer. Entretanto, com o auxílio da modelagem matemática, esse procedimento pode ter uma habilidade de predição, pois pode ser ajustado com novos cenários e necessidades. Todavia, ao optar-se pela modelagem matemática, deve-se atentar para as variáveis que envolvem os fenômenos, de modo que o prognóstico seja viável e mais confiável.

Monitorar a qualidade da água e em paralelo utilizar a modelagem matemática - sendo esse modelo ajustado à bacia - faz com que a relação entre flexibilidade e custo seja melhorada, comparando com o uso apenas da técnica de monitoramento, já que modelos matemáticos simulam cenários diferentes (LARENTIS, 2004).

Na elaboração desses cenários, as características como geometria, tipo de solo/revestimento do canal, vazão, perfil de velocidade e coeficiente de dispersão, normalmente são as mais adotadas. Os modelos (Quadro 2) podem simular tanto a recepção de uma carga poluidora, como o efeito dessa carga em corpos hídricos (JESUS, 2006).

A seleção do modelo e os parâmetros a serem utilizados na simulação interferem nos resultados obtidos. Com isso, modelos matemáticos têm sido

desenvolvidos para diversos fins e em consonância com as diversas possibilidades e interesses (FAN, KO e WANG, 2009).

Quadro 2 - Evolução dos Modelos Matemáticos de Qualidade de Água

Streeter-Phelp	1920
Modelos Mecanísticos e Empíricos de Nutrientes	1940
Fundamentação e direção de trabalhos para o desenvolvimento de uma ampla classe de Modelos	1960
Modelos de Eutrofização e Modelos para Rios mais complexos	1970
Conhecimentos mais específicos do Ecossistema	1980
Novas Ferramentas Matemáticas	1990
Aplicações de Modelos usando Estratégias Numéricas	2000
Gerenciamento de Risco	2014
Simulação de dispersão de poluentes	2016
Transporte de contaminantes	2019



Fonte: Adaptado de Romieiro (2003).

Existem os modelos mecanísticos, baseados em teoria científica e os modelos empíricos, baseados em experimentações, coleta de dados e análises (ROMIEIRO, 2003).

No Quadro 3 estão relacionados os dois tipos de modelo (mecanístico e empírico), mostrando como eles se comportam com um sistema experimental. Os três métodos (empírico, mecanístico e experimental) são explorados a partir de um problema real.

Quadro 3 - Tipos de abordagem nos modelos matemáticos

Abordagem Empírica		Abordagem Mecanística		Sistema Experimental
Realidade	↓	Realidade	↓	Realidade
↓	↓	Hipóteses	↓	Realizar experimento
Modelo Matemático	↓	Modelo Matemático	↓	↓
Solução	↓	Solução	↓	Dados do experimento
Dados previstos pelo modelo	⇒	⇒	⇒	Comparar e testar a validade do modelo

Fonte: (SODRÉ, 2007)

Na abordagem empírica, a partir do problema real, a simulação matemática é realizada tendo, como resultado final, a solução para o problema simulado. Já na abordagem mecanística, que também parte do problema real, são levantadas hipóteses desse problema para então obter a simulação matemática e a solução.

Em sistemas experimentais, com o problema real, realiza-se experimentos na área estudada – que será simulada, para então realizar a simulação matemática, comparando os resultados simulados e experimentais com vistas à validação do modelo.

De forma qualitativa e quantitativa, os modelos matemáticos que tentam descrever os fenômenos da vida real podem ser descritos tanto por equações diferenciais (SODRÉ, 2007), para variáveis contínuas, quanto por equações de diferenças, para variáveis discretas. Este estudo se baseia num sistema de equações de diferenças que, segundo Edelstein (1988), são adequadas quando as análises se fazem em tempo discreto, idealizando matematicamente um fenômeno biológico.

3. ESTUDO DA CORRELAÇÃO

Considerando que as variáveis de interesse: condições hidráulicas, geométricas e o coeficiente de dispersão em relação às quantificações do coeficiente de dispersão longitudinal (pelo método indireto) são discrepantes (DEVENS, 2006; OLIVEIRA, 2013; LOPES, 2016), devido a condições hidráulicas e geométricas distintas e variadas nos cursos d'água, a análise de correlação pode auxiliar no estudo do possível relacionamento entre as variáveis.

O estudo da correlação é uma técnica importante (BRENTAN, 2017) quando vinculada à quantificação do coeficiente, pois encontra relações entre as variáveis mensuradas, apontando as variáveis de maior interferência no coeficiente. Essa técnica pode ser qualitativa (Mapa Auto Organizável) e quantitativa (Análise de Componentes Principais).

3.1 Mapa Auto Organizável

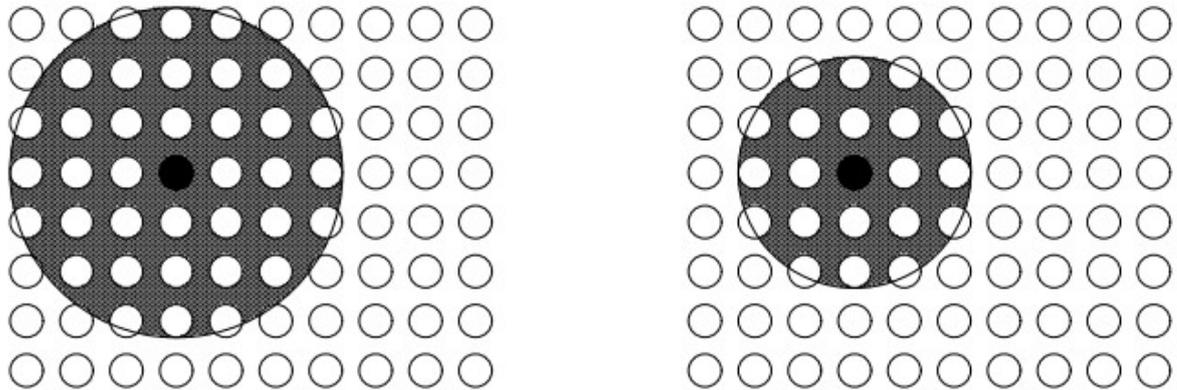
O *Self-organized map* (SOM), conhecido como Mapa Auto Organizável, foi inicialmente proposto por Kohonen (1982) e é uma ferramenta qualitativa em que os mapas são um tipo de rede neural baseada no comportamento cerebral sob estímulos tanto visuais como de memória. Por exemplo, quando o cérebro é estimulado, diferentes regiões reagem a esse estímulo e com isso é possível separar diferentes estímulos, tornando a resposta cerebral rápida.

O SOM utiliza um modelo de treinamento competitivo cujos neurônios competem entre si, ajustando seus respectivos pesos. O treinamento dessa rede é relativamente simples e utiliza duas etapas: competitiva e cooperativa. Além disso, tem apenas 4 variáveis a serem determinadas de início: vizinhos, passos, dimensão e topologia. Para as três primeiras variáveis recomenda-se utilizar um processo iterativo, ou seja, começar com valores menores e analisar o impacto que causa nos mapas, e a topologia refere-se ao formato da malha, que pode ser retângulos ou hexágonos.

No treinamento, a fase competitiva está relacionada com a distância entre a variável de entrada e todos os neurônios, sendo que o neurônio mais perto denomina-se neurônio vencedor. E com isso, esse neurônio influencia o peso dos seus vizinhos criando uma região especialista.

Na fase cooperativa, os pesos dos vizinhos são ajustados, ou seja, reduz a região especialista criada pela fase anterior, pois quanto mais longe um neurônio estiver do neurônio vencedor, menos ele deve ser influenciado pelo mesmo. Com isso a área de influência do neurônio vencedor tende a diminuir, como ilustra a Figura 3.

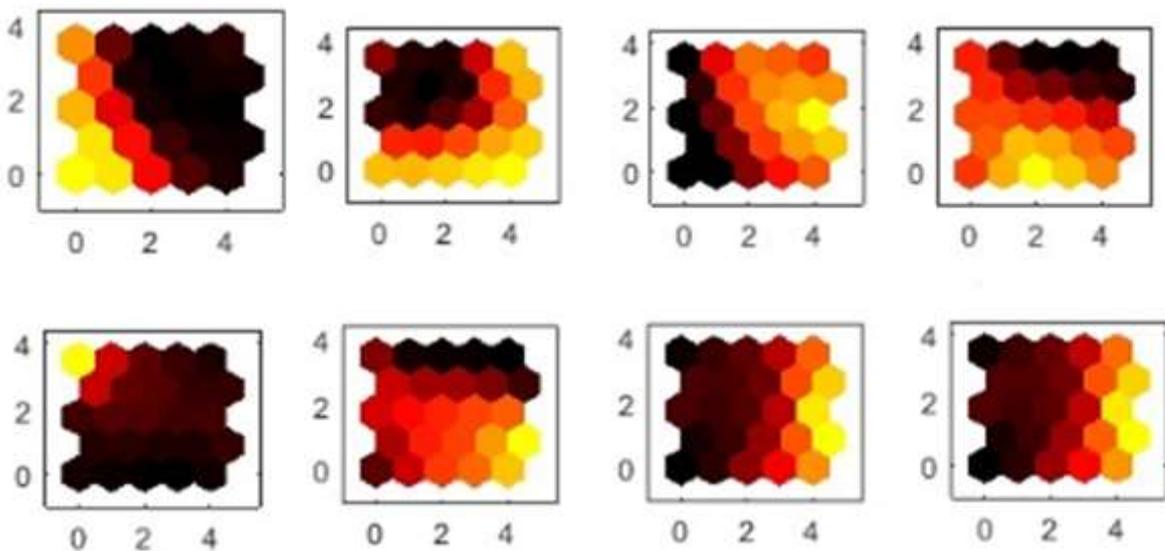
Figura 3 - Influência neurônio vencedor



Fonte: Acervo do autor.

Com o mapa gerado pelo SOM, é possível estabelecer a divisão dos setores, pré-estabelecidos, de entrada, a partir das variações, similaridade e correlações entre os pontos. A Figura 4 traz o mapa de saída da técnica do SOM utilizando tons quentes. Nele é possível visualizar oito mapas diferentes (que se refere a oito variáveis de entrada *versus* a variável analisada), e com dimensão de 5x5, já que o banco de dados utilizado para a análise era pequeno (matriz de 8x15).

Figura 4 - Exemplo do mapa de saída do SOM



Fonte: Acervo do Autor.

Os tons se referem a relação que as variáveis de entrada possuem com a variável analisada, ou seja, pelo padrão de cores é possível visualizar indícios de correlação positiva (cores quentes) ou negativa (cores claras) entre as variáveis analisadas.

3.2 Análise de Componentes Principais

A segunda técnica é a *Principal Component Analysis* (PCA), que no português é traduzida como Análise de Componentes Principais, uma ferramenta quantitativa que dispõe de resultados visuais e numéricos, relacionando linearmente as variáveis, ou seja, o PCA faz uma transformação linear das variáveis de entrada a fim de afirmar a correlação entre elas (BRENTAN, 2017).

Os componentes principais apresentam propriedades importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016, pag. 84 apud JOHNSON; WICHERN, 1998; HONGYU, 2015).

Para calcular o componente principal (PC) essa técnica determina uma matriz de covariância entre as variáveis utilizadas e depois calcula os autovalores e autovetores da matriz, ou seja, transforma uma tabela de dados experimentais em gráficos informativos.

Esses gráficos geram η componentes principais (η é o número de parâmetros analisados), para então escolher quais componentes serão analisados, o que é possível de se obter através da tabela resposta que o PCA fornece (HONGYU, SANDANIELO e JUNIOR, 2016).

Com isso, é possível interpretar o gráfico de PCA (Figura 5), onde PC1 e PC2 são expostos nos eixos x e y respectivamente. Os componentes presentes no quadrante 1 possuem maior relação com o componente PC2 e os componentes presentes no quadrante 4 possuem maior relação com o componente PC1.

Figura 5 - Gráfico PCA



Fonte: Acervo do Autor.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. MODELAGEM MATEMÁTICA E COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL

Sales, Araújo e Chagas (2014) estudaram gerenciamento de riscos qualidade de água utilizando a Teoria de Fuzzy em modelos advectivo-difusivo, desenvolvendo um modelo capaz de apresentar detalhes compatíveis com as observações realizadas em campo. No estudo, simularam um canal retangular subdividido em várias partes iguais, concluindo que os lançamentos em rios (para o mesmo tipo de lançamento), quando as vazões dos rios são maiores, são produzidos menos campos de riscos.

A modelagem matemática para a estimativa de impactos ambientais vem crescendo nos últimos anos. Exemplos recentes dessas aplicações podem ser encontrados em Zhang et al. (2017) que aplicaram modelagem para analisar o transporte de nutrientes no Lago Honhu na China; em Venturino, Tiwari e Misra (2016), que modelaram o oxigênio dissolvido em um corpo d'água; em Santos, Vidal e Lopes (2016) que desenvolveram um modelo de dispersão advectiva para estudar áreas de concentração em rios naturais; em Fan, Bravo e Collischonn (2016) que aplicaram a modelagem para a simulação da dispersão de poluentes em cursos d'água baseando-se em agentes (fenômenos de dispersão, advecção e decaimento de poluentes lançados em cursos d'água); em Harari et al. (2013), que utilizaram a modelagem para compreender a dispersão de esgoto na baía de Santos (SP); no trabalho de Cunha e Pinheiro (2013), os autores usaram a modelagem para a simulação hidrodinâmica e a dispersão de agentes passivos; em Lins et al. (2012), onde apresentaram um modelo com a finalidade de facilitar a tomada de decisões no plano de recursos hídricos da bacia do Rio Doce. E por fim, nos trabalhos de Lopes (2016); Oliveira (2017) e Silva (2017) que estudaram a dispersão de um traçador conservativo em canal hidráulico com simulações computacionais.

Há modelos que simularam o episódio de rompimento da barragem em Mariana (MG), com objetivo de estimar o tempo necessário para a lama deixar o rio e analisar a dinâmica do escoamento da lama no rio, envolvendo transporte de massa, utilizando o modelo de transporte por advecção e o modelo de transporte por advecção-difusão), obtendo resultado melhores com a abordagem do segundo modelo (SILVA, JUNIOR e PEREIRA, 2018).

Já no trabalho de Machado et al. (2019) o modelo matemático utilizado simulou a dispersão de poluentes em um corpo d'água. Utilizaram gráficos do comportamento da concentração *versus* distância e do tempo para analisarem o comportamento da dispersão e os resultados obtidos mostraram que o modelo consegue representar o fenômeno adequadamente.

Coimbra e Telles (2019) modelaram transporte de contaminantes utilizando métodos dos volumes finitos no Rio São Pedro/RJ, observaram que os valores numéricos se aproximam dos valores reais e obtiveram também uma variação do coeficiente de dispersão longitudinal e concluíram que o mesmo tem grande influência no pico de concentração da pluma de contaminante.

Pode-se notar que ao trabalhar com transporte de massa destaca-se um ponto crucial da pesquisa que é o desenvolvimento da metodologia (VIDAL, CHAGAS e SOUZA, 2015).

Vidal, Chagas e Souza (2015) desenvolveram uma metodologia com base na mecânica dos fluidos computacional para avaliar o comportamento do transporte. Os autores desenvolveram um programa computacional que permitiu a realização de um conjunto de simulações para vários tipos de cenários reais encontrados nas relações entre o homem e o rio e os resultados mostraram que o comportamento da concentração é bastante influenciado pelas características hidráulicas do canal, pois quanto maior o coeficiente de rugosidade, menor é a celeridade de propagação da nuvem poluente e para maiores declividades, maiores são os valores de concentração.

Zeng e Huai (2014) avaliaram a precisão dos diferentes tipos de equações empíricas apresentadas na literatura para a determinação do coeficiente de dispersão longitudinal. Para isso, usaram conjuntos de dados médios em rios dos EUA e Reino

Unido fazendo a comparação entre os dados de medição de laboratório e predição da equação empírica. Os resultados mostraram que o modelo recentemente apresentado é eficaz na previsão de dispersão longitudinal em canais trapezoidais artificiais.

O traçador mais usado para determinação do coeficiente e dispersão longitudinal é a solução salina (NaCl). Pereira et al. (2016) usaram essa solução, juntamente com marcadores fluorescentes, e determinaram o coeficiente de dispersão em três fluxos interceptados pela rodovia BR-050 (Rio Paraíba), através de métodos diretos e de equações que melhor apresentaram resultados de concentração de pico e os métodos de concentração coroa.

No trabalho de Silva, Peclly e Azevedo (2017) foi utilizado um trecho do Rio Piabanha para avaliar o transporte de dispersão, usando traçador fluorescente. Os resultados indicaram que o modelo teve ótima concordância com os dados coletados através dos testes com os traçadores e os autores ressaltam a importância de um monitoramento em maior quantidade das seções de uma bacia, como o levantamento batimétrico, acompanhando a grande irregularidade do curso d'água a ser estudado.

2. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS E MAPAS AUTO ORGANIZÁVEIS

Correlação é a relação ou dependência entre duas variáveis. Dentre os métodos de estudo de correlação destaca-se nesse trabalho a Análise de Principal Componente e os Mapas Auto Organizáveis. Na Análise de Principal Componente, PCA, a correlação é usada pela capacidade de compreensão das variáveis (na finalidade da existência de correlação) (SABIN; FERRÃO; FURTADO, 2004), já nos Mapas Auto Organizáveis, SOM, a correlação é usada como reconhecimento de padrões (SPERANDIO; COELHO; QUEIROZ, 2003). Ressalta-se que o PCA é uma análise quantitativa, já o SOM uma análise qualitativa.

Dentre os métodos que possibilitam essas análises, estudos na área ambiental que utilizaram PCA tiveram resultados satisfatórios, como visto em Palau et al. (2004) que analisaram a aplicação do PCA na quantidade de dados armazenados em um sistema de abastecimento de água, a fim de avaliar se a análise multivariada

seria melhor empregada do que a análise univariada. Os autores concluíram que os gráficos de PCA são sensíveis em detectar valores discrepantes e ressaltam que mesmo sendo uma técnica pouco utilizada, contribuem positivamente para a área do seu estudo.

Já no trabalho de Souza et al. (2014) foi estudado a correlação entre poluentes atmosféricos e atendimentos hospitalares, concluindo que os poluentes estudados explicaram 83,2% da variabilidade total, ou seja, o nível de admissão teve relação significativa com os níveis de concentração dos poluentes.

Alguns trabalhos também usaram a técnica para estudarem características físico-químicas da água, como visto em Rocha e Pereira (2015), que correlacionaram parâmetros de monitoramento (cor, turbidez, ferro, fósforo, cloreto, condutividade, DBO e OD) em manancial na cidade de Juiz de Fora/MG. Os autores concluíram que os parâmetros explicam mais de 70% da variação dos dados de qualidade do manancial.

Os estudos de Silva et al. (2016) concluíram que o fluxo de metano no Rio Abobral é influenciado pela interação entre as características físico-químicas, principalmente pH e OD. Já no trabalho de Amorim et al. (2017), os autores avaliaram características físico-químicas e microbiológicas da água e confrontaram com o índice de qualidade de água e Resolução Conama 430/2011 revelando uma correlação moderada.

De acordo com Senna et al. (2019), que usaram o PCA para determinar o peso dos sub-índices em relação aos recursos hídricos, baseando no Índice de Pobreza Hídrica, as variáveis analisadas foram: recursos, acesso, capacidade, uso e ambiente. Eles concluíram que uso e capacidade de acesso representam mais de 90% do valor total do índice e confirmam que: “Nossos resultados mostram que essa abordagem possibilita identificar qualitativamente as localizações geográficas que têm maior pobreza hídrica em comparação com outras” (SENNA et al. pag.1 ,2019).

A utilização de PCA no trabalho de Silva e Goveia (2019) facilitou a comparação dos indicadores de qualidade de água de corpos hídricos urbanos de Sorocaba/SP e observou também que três componentes analisados explicam 87,40%

da variância total identificando que a principal fonte de poluição vem de resíduos sólidos domésticos.

A técnica SOM vem sendo utilizada em diversas áreas, pela sua capacidade de extrair um padrão (KOHONEN, 2001). Exemplos, como no trabalho de Dong et al. (2012), que aplicaram o SOM para avaliar os efeitos dos parâmetros físico-químicos no desempenho do tratamento de sedimentos em que a Concentração de Oxigênio Dissolvido e a Condutividade foram correlacionadas com a redução de Nitrogênio Amoniacal e/ou Fósforo.

Kalteh et al. (2008) fizeram um estudo explicando o algoritmo do SOM e sua aplicação em recursos hídricos e concluíram que o SOM é um técnica promissora, adequada para investigar, modelar e controlar muitos tipos de processos e sistemas de recursos hídricos.

A técnica também foi aplicada para setores e interconexões na cidade de Franca/SP e Santa Barbara d'Oeste/SP para previsão de demanda de água e o autor concluiu que hora do dia e temperatura possuem correlação positiva (BENTRAN, 2017).

Para correlacionar qualidade da água com comunidades de peixes no norte de Twain, Tsai et al. (2017) utilizaram o SOM para oito parâmetros de qualidade de água e vinte e cinco espécies de peixes, reafirmando que visualização dos mapas topológicos construídos do SOM podem produzir uma inter-relação detalhada entre a qualidade da água e as espécies de peixes.

Por fim, no trabalho de Mattos e Silva (2019) utilizaram a técnica do SOM para zonestar áreas hidroquímicas de águas subterrâneas na cidade de Itabuna. Esse zoneamento partiu de parâmetros como Bicarbonato, Sulfato, Cloro, Nitrato, Sódio, Potássio, Cálcio Magnésio e Condutividade elétrica, e através do SOM foi possível dividir as águas em: águas com menos salinidade, doces e predominantemente moles. Os autores reiteram que o uso do SOM pode promover uma efetiva interação da gestão urbana.

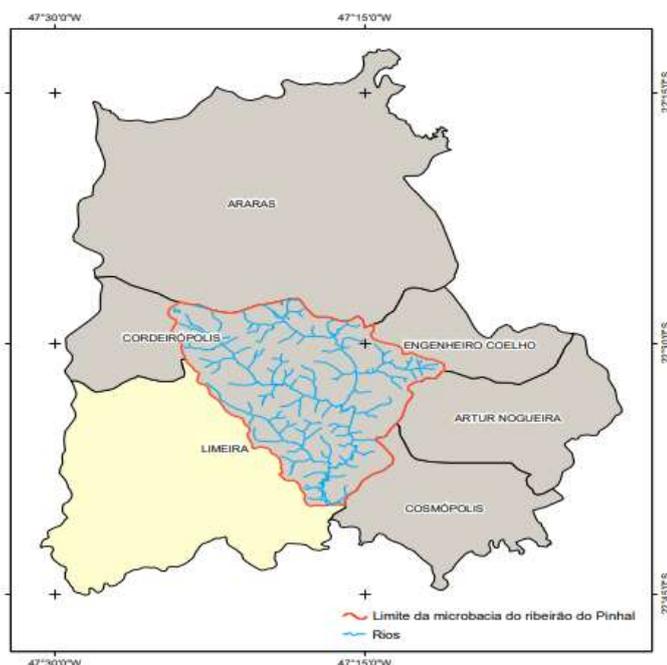
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está no município de Limeira nas coordenadas de Latitude: 22°31'11.02793"S e Longitude: 47°21'09.64929"W, situada no interior de São Paulo/Brasil. Limeira possui dois mananciais para captação de água para abastecimento público: Rio Jaguari e Ribeirão Pinhal, ambos localizados na Bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BACIA PCJ).

O manancial escolhido para esse estudo é o Ribeirão Pinhal, justamente por ele ser um dos mananciais utilizados para abastecimento público por Limeira, tornando sua preservação estratégica, conforme mostra a Figura 6. O Ribeirão Pinhal se enquadra, de acordo com a resolução CONAMA nº357, de 2005, como um rio de classe 2 e pela concessionária atual (BRK AMBIENTAL) é monitorado a cada segundo por uma sonda multi-parâmetros (Estação de Alerta).

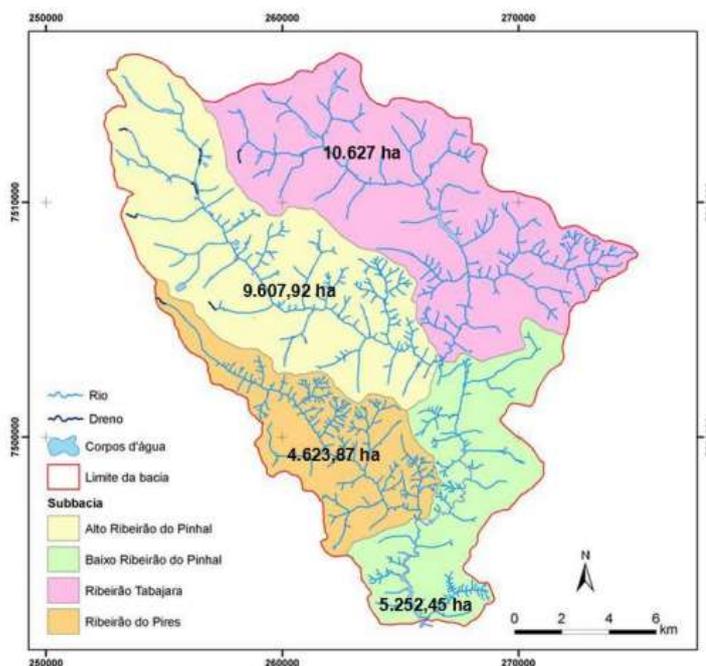
Figura 6 - Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão Pinhal



Fonte: (LIMEIRA (SP), 2016/2017)

O Ribeirão Pinhal é composto por quatro sub-bacias hidrográficas (Figura 7): Alto Ribeirão do Pinhal, Baixo Ribeirão do Pinhal, Tabajara e Pires, sendo o Pinhal (alto e baixo) o curso d'água principal e os Ribeirões Tabajara e Pires, seus afluentes.

Figura 7 - Limite e áreas das sub-bacias do Ribeirão Pinhal



Fonte: (LIMEIRA (SP), 2016/2017)

Com o aumento de chácaras recreativas na região do Ribeirão Pinhal e seu contorno caracterizado pelas atividades agrícolas de produção de laranja e cana de açúcar, há um interesse da proteção e recuperação desse manancial.

2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Para o levantamento topográfico foram realizados o levantamento georreferenciado, o planialtimétrico regular e, por fim, o batimétrico controlado através de nivelamento geométrico.

O levantamento georreferenciado foi feito para determinar a geoposição da área do trabalho para que ela tivesse a sua posição global definida, o que permite a

conexão espacial tridimensional do presente projeto com outros já existentes ou que venham a ser executados.

Para isso, foram empregados receptores GPS *Asthech Promark II*, de precisão centimétrica, além de acessórios para a coleta dos dados e o programa computacional *GNSS Solutions* para determinar as coordenadas de latitude, longitude e altura geométrica de três marcos referenciais materializados no projeto para esse fim.

O levantamento planialtimétrico regular foi feito para se conhecer a geometria plana do curso d'água e os desníveis do terreno representado pelas suas curvas de nível, reproduzidos em ambiente digital tridimensional que permitiu a produção da planta exata da área. A fim de que isto fosse possível, foi medida uma poligonal fechada com três vértices, tendo como origem os vértices georreferenciados da etapa anterior. A partir dessa poligonal foram levantados todos os pontos de interesse ao longo do trecho monitorado necessários para reproduzir em ambiente digital tridimensional o objeto de estudo que é o ribeirão, com suas margens, com as posições das seções de monitoramento e com os pontos medidos nas seções de monitoramento. Em cada seção foram levantados os pontos para caracterizar as margens, o nível da lâmina d'água (N.A.) na margem esquerda e na margem direita, o leito do rio e vários pontos em seu interior, definidos para se conhecer a geometria da área molhada. Nesse levantamento foi utilizada uma Estação Total FOIF - RTS105 e acessórios.

O levantamento batimétrico foi feito a vau e constituiu-se na medição vertical de vários pontos escolhidos ao longo de cada seção de monitoramento, com espaçamento de aproximadamente 0,5 metros, a partir dos quais mediu-se com o uso de uma mira estadimétrica a profundidade do leito do ribeirão, sempre a partir da lâmina d'água. Embora essa metodologia fosse suficiente para obter o valor da área molhada, as profundidades foram medidas empregando o método de nivelamento geométrico, de precisão milimétrica, com o uso de um nível automático PENTAX - AFL320. As profundidades foram simultaneamente medidas empregando o método de nivelamento trigonométrico, de precisão centimétrica, feito com a estação total mencionada no levantamento anterior. Esse procedimento adicional possibilitou que

todos os pontos que constituem a calha do ribeirão no trecho do projeto tivessem as suas altitudes conhecidas facilitando a sua conexão com outros projetos existentes ou projetos que venham a ser desenvolvidos na área.

3. CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

Com todo o levantamento topográfico realizado foi necessário detalhar as características hidráulicas do curso d'água. Para que isto ocorresse, fez-se o levantamento do perfil de velocidade nos pontos de monitoramento empregando um molinete, instrumento comum para medição de velocidade em rios. Os molinetes são instrumentos compostos por hélices que rotacionam a partir da passagem da água.

As medições ocorreram nos pontos de monitoramento obedecendo as alturas do perfil de velocidade (20%, 60%, 80% da lâmina d'água). A velocidade V (m/s) é medida através de equações que acompanham o instrumento. Para a hélice utilizada (nº17888), foram empregadas as seguintes equações:

Se $n \leq 1,27$, sendo n a rotação por minuto da hélice e V a velocidade calculada:

$$V = 0,0959n + 0,030 \quad \text{Equação 17}$$

Se $n \geq 1,27$, sendo n a rotação por minuto da hélice e V a velocidade calculada:

$$V = 0,1030n + 0,021 \quad \text{Equação 18}$$

Conheceu-se também o comprimento da zona advectiva (Equações 19, 20 e 21), ou seja, a região que conglomera os campos iniciais e os intermediários, pois nessa zona advectiva a mistura lateral ainda não é completa, mas representa que após a distância do comprimento advectivo a mistura começa a se tornar completa.

$$L_X = 0,0532 \frac{U \cdot B^2}{H^2 \cdot S_o^2} \quad \text{Equação 19}$$

$$Lx = 0,4. U \frac{B^2}{0,6.H.u^*} \quad \text{Equação 20}$$

$$Lx = 0,26. U \frac{B^2}{H} \quad \text{Equação 21}$$

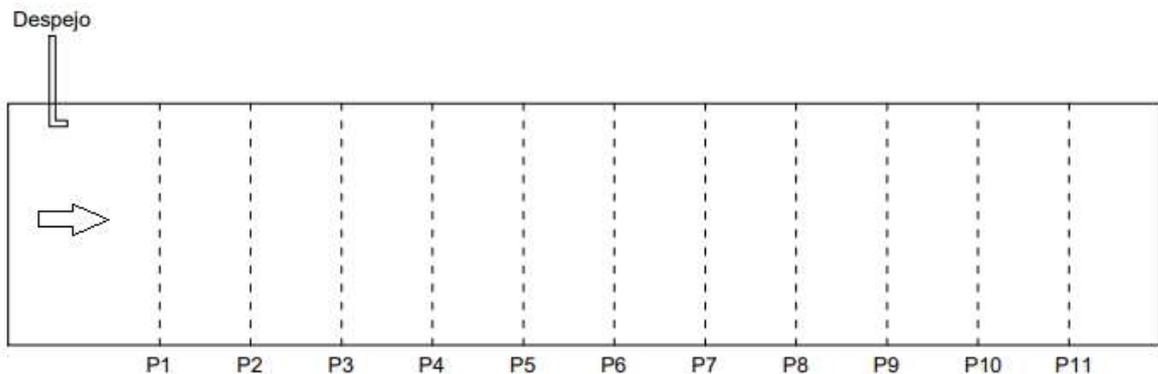
onde: L_x = comprimento da zona advectiva (m); U = velocidade média do rio (m/s); B = largura média do rio (m); H = profundidade média do rio (m); S_o = Declividade (m/m), u^* = velocidade de atrito (m/s).

4. DETERMINAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DE MONITORAMENTO

Baseado no levantamento topográfico e na caracterização hidráulica determinou-se 11 compartimentos de monitoramento tridimensional, adotando-se uma distância de aproximadamente 1,5m entre os compartimentos.

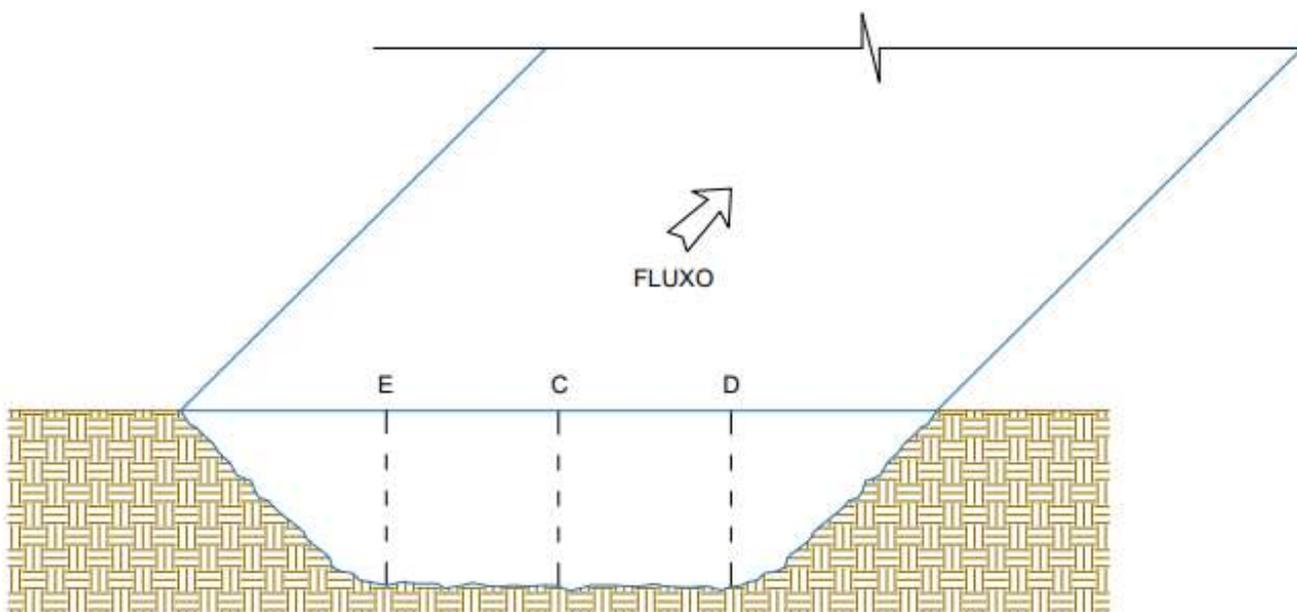
Observa-se na Figura 8, que a denominação longitudinal ocorreu por ordem numérica. Já no monitoramento transversal, a denominação ocorreu baseada na posição do monitoramento em relação ao sentido do escoamento, centro (C), direita (D) e esquerda (E) (Figura 9).

Figura 8 - Denominação longitudinal de monitoramento.



Fonte: Acervo do Autor.

Figura 9 - Denominação transversal de monitoramento.



Fonte: Acervo do Autor.

5. MONTAGEM DOS COLETORES

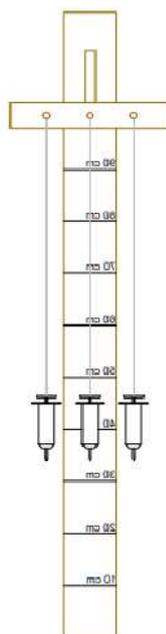
Com as etapas anteriores finalizadas, confirmou-se os pontos de coleta e as alturas de coleta e, assim, desenvolveu-se um coletor com possibilidade de três níveis de coleta. Como foram muitos pontos monitorados e as coletas nos compartimentos foram realizadas simultaneamente, optou-se por desenvolver onze coletores. Os materiais usados para montar os coletores foram:

- Estacas de madeira: As estacas eram de madeira Aroeira e serviram de base para os coletores, tinham 1 metro de comprimento, 0,05 metros de espessura e aproximadamente 0,08 metros de largura. As onze estacas foram graduadas, usando como referência uma trena calibrada, para facilitar no posicionamento variado das alturas de coleta.
- Seringas: foram utilizadas para coletar e armazenar as amostras. Cada estaca de madeira detinha três seringas de 60ml cada.

- Acessórios: para fixar e succionar as amostras foram necessários fios de aço de 0,0008m, braçadeiras tipo 'D' de ferro galvanizado, arruelas lisas, parafusos sextavados, e um puxador de madeira.

O protótipo dos coletores pode ser visto na Figura 10.

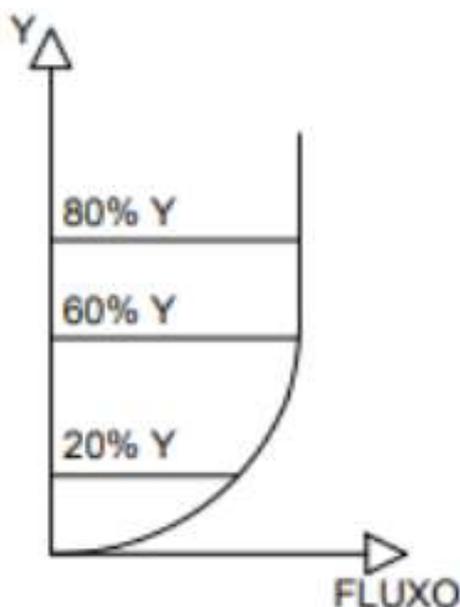
Figura 10 - Protótipo do coletor.



Fonte: Acervo do Autor.

Como as coletas ocorreram em três alturas (Figura 11), os coletores precisavam ser flexíveis no quesito altura das seringas, pois as alturas de coleta variam de acordo com a lâmina d'água.

Figura 11 - Sistema base para as coletas, onde y é a altura da lâmina d'água.

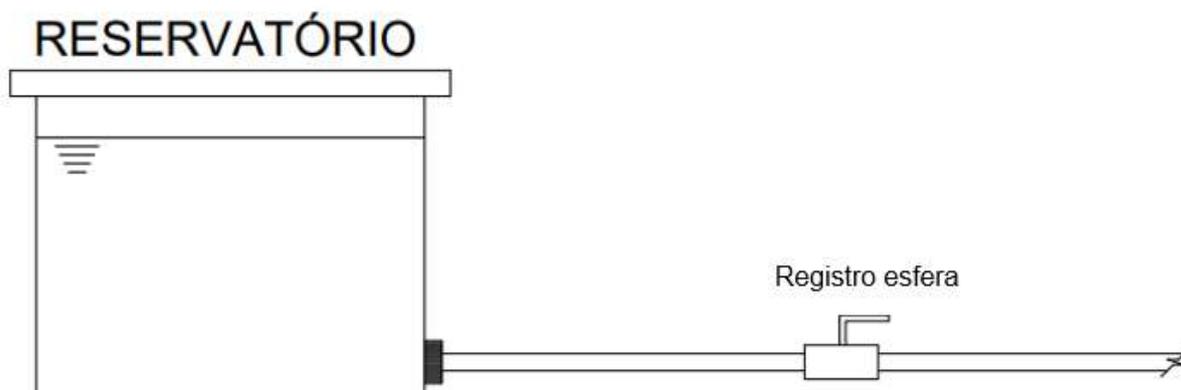


Fonte: Acervo do Autor.

6. COLETAS

A metodologia utilizada foi desenvolvida por Lopes (2016) contendo adaptações. O primeiro passo foi conhecer o comportamento do escoamento do curso d'água, sendo assim, um despejo pontual de um corante foi realizado e analisou-se o tempo gasto para atingir toda a área de estudo. O despejo ocorreu através de um reservatório conectado a uma mangueira de 2" de diâmetro (aproximadamente 0,05m) e registro esfera para controle de fluxo, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Esquematização do sistema de despejo

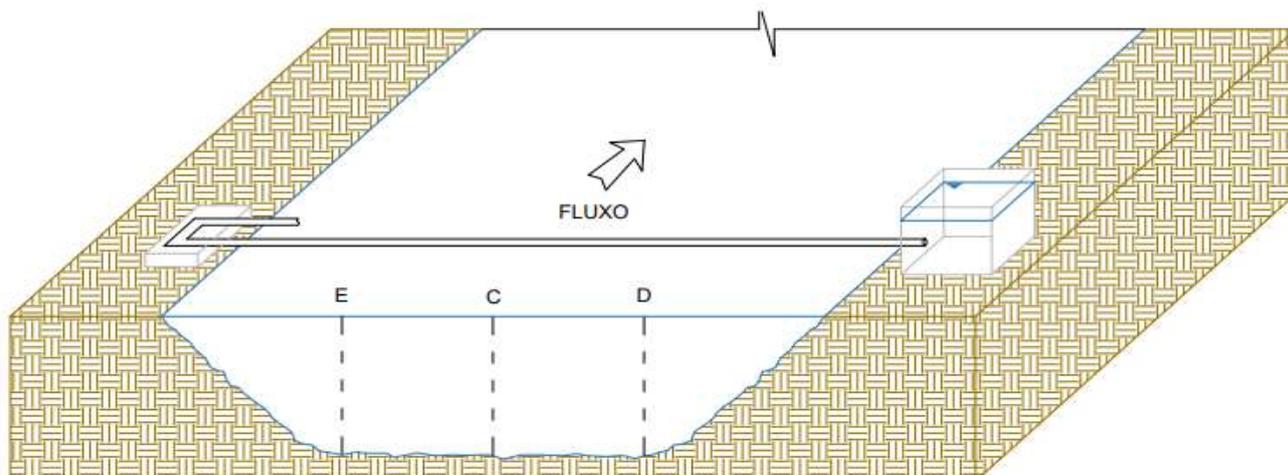


Fonte: Acervo do Autor.

O traçador utilizado para despejo foi o Cloreto de Sódio (NaCl) e o corante utilizado foi o azul de metileno. As coletas ocorreram no sentido contrário ao fluxo, ou seja, foram iniciadas pelo compartimento 11 e finalizadas no compartimento 1 e teve início assim que a pluma do corante tocou o compartimento 11.

O despejo do traçador ocorreu pela margem esquerda, como visto na Figura 13. Foram necessárias seis pessoas para realização das coletas, três dentro do rio com os coletores e o restante na margem recolhendo os coletores, armazenando as amostras e disponibilizando coletores devidamente limpos e com as seringas posicionadas.

Figura 13 - Logística do despejo



Fonte: Acervo do Autor (2018)

Para garantir o fluxo constante do despejo, monitorou-se a vazão e a concentração de despejo, e também o nível de mistura dentro do reservatório.

7. ANÁLISE DAS AMOSTRAS

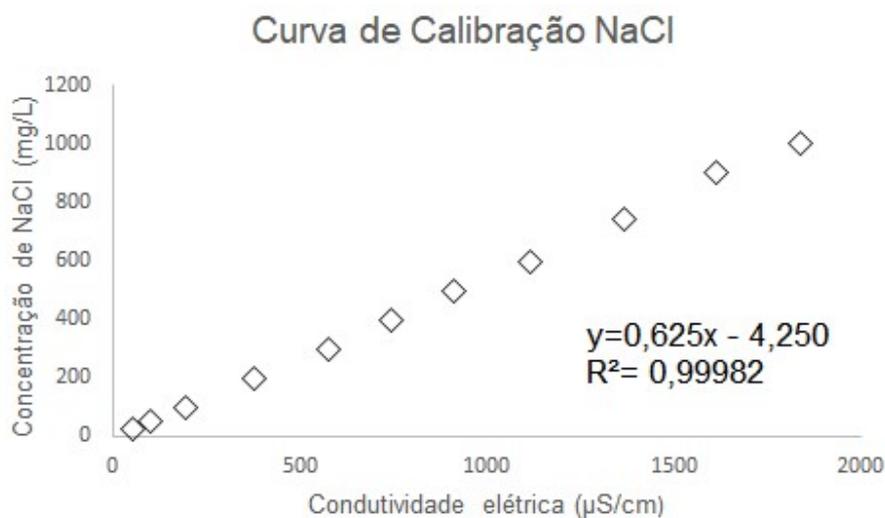
Com o intuito de conhecer e monitorar a formação da pluma, foi necessário achar a relação *Concentração x Ponto de Coleta*. Para isto analisou-se as amostras coletadas utilizando um condutivímetro (Tecnal). Iniciou-se calibrando o equipamento com uma solução conhecida de NaCl, após cada leitura de condutividade essa solução recebia uma adição de uma massa conhecida de água destilada (reduzindo a concentração), ou seja, a curva de calibração do equipamento foi baseada no processo de diluição em série.

Com a curva de calibração traçada (Figura 14) foi possível obter os valores de concentração nos pontos monitorados. A Equação 22 representa a transformação da condutividade em concentração.

$$C = 0,625Cd - 4,520 \quad \text{Equação 22}$$

onde: C : concentração em mg/L, Cd : condutividade em $\mu\text{S/cm}$.

Figura 14 - Curva de Calibração Cloreto de Sódio



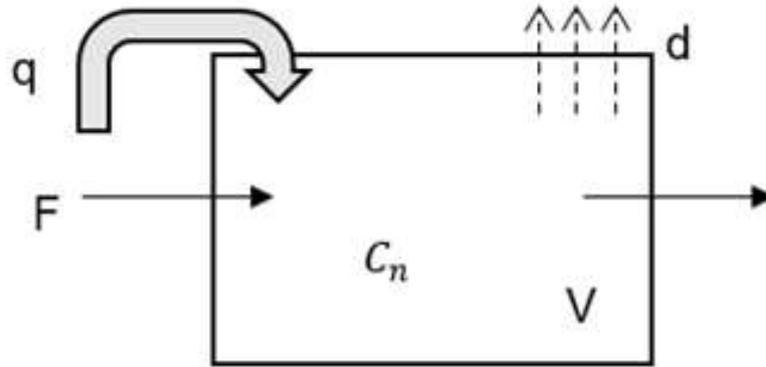
Fonte: Acervo do Autor.

8. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático utilizado caracteriza-se por um sistema de equações de diferenças que estima a concentração do poluente no tempo atual, fluxo e volume do rio, degradação do poluente e aporte. O modelo foi implementado no Matlab® (versão 16ª).

Assim como proposto por Alves (2009) e Montovani (2012) considera-se a área do ribeirão monitorado homeomorfa a um retângulo (Figura 15). A avaliação da concentração de poluentes é dada pela concentração do poluente no tempo futuro depende da concentração do poluente no tempo presente menos “o que sai” com o fluxo, menos “o que degrada”, mais “o aporte”.

Figura 15 - Representação do Modelo de Equações de Diferenças



Fonte: Acervo do autor

Matematicamente, tem-se:

$$C_{n+1} = C_n - \frac{F}{V}C_n - dC_n + q \quad \text{Equação 23}$$

onde:

 C_{n+1} : concentração do poluente no instante futuro (kg/m^3); C_n : concentração do poluente no instante atual (kg/m^3); F : fluxo do rio (m^3/s); V : volume (m^3); d : decaimento do poluente (s^{-1}); q : fonte poluidora (kg/m^3);

Para o estudo em questão, o ribeirão foi então subdividido em três compartimentos na sua largura, denominados compartimentos à direita (D), central (C) e esquerda (E), e em onze compartimentos no comprimento, perfazendo um total de trinta e três subdivisões homeomorfas a retângulos, cada uma com sua respectiva equação. Assim feito, tornam-se possíveis as análises das concentrações do poluente nos trinta e três pontos determinados, bem como o estudo do perfil de velocidade e também da pluma formada pelo corante através de filmagem da mesma.

De modo a visualizar a relação entre os compartimentos, estudou-se *in loco* o comportamento do fluxo através de observações e experimentações. Os resultados deste procedimento seguem apresentados na seção 4.2 do capítulo V.

8.1 Os parâmetros da equação

Essa etapa é fundamental para a eficácia do modelo, já que é aqui que todos os parâmetros das equações são mensurados.

Para melhor entender os termos do modelo, os mesmos são denominados de acordo com a terminologia hidráulica.

A técnica de mensuração de cada parâmetro foi: concentração do poluente e aporte foram mensurados através das leituras das amostras com condutivímetro. O fluxo do rio foi calculado através do perfil de velocidade juntamente com a equação da continuidade (Equação 24). Os volumes foram mensurados através da Equação 25 e detalhada visualmente pela Figura 16.

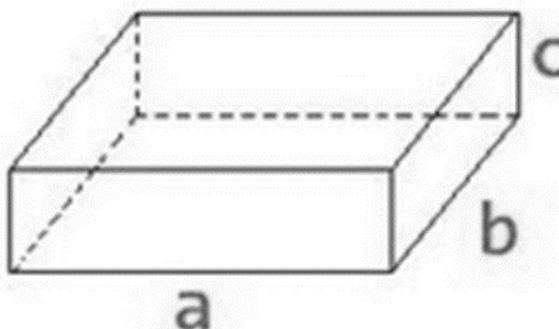
$$Q = V.A \quad \text{Equação 24}$$

onde: Q = vazão (m^3/s), V =velocidade (m/s) e A = área (m^2).

$$v = a.b.c \quad \text{Equação 25}$$

onde: v = volume (m^3), a,b,c = arestas (m)

Figura 16 - Exemplificação do cálculo de volume



Fonte: Acervo do autor.

9. ESTUDO DE CORRELAÇÕES

O estudo das correlações entre as variáveis: profundidade, velocidade, declividade, largura, vazão, raio hidráulico, coeficiente de mistura e coeficiente de dispersão longitudinal, foi realizado com o intuito de entender a relação do coeficiente de dispersão longitudinal com as variáveis restantes.

As variáveis profundidade e largura foram extraídas a partir do levantamento batimétrico. A variável velocidade foi medida através do equipamento molinete.

Para a quantificação da variável velocidade de atrito, utilizou-se a Equação 26.

$$u * = \sqrt{g \cdot S \cdot H} \quad \text{Equação 26}$$

onde u^* = velocidade de atrito, g = gravidade, S = declividade, e H = profundidade.

Para o cálculo da declividade usou-se a diferença de altitude entre o início e o fim do curso d'água estudado (dados retirados do levantamento topográfico), e dividiu-se pelo comprimento total da área de estudo.

Com as variáveis em posse foi possível calcular os coeficientes de dispersão para então obter as correlações.

O banco de dados utilizado para o estudo de correlações, tanto para PCA quanto para SOM, foi o mesmo, salvo diferenças de formatação. O banco de dados está disponível no capítulo IV.

Para a aplicação do PCA utilizou-se o software Past®, na versão 326b.

Para a aplicação do SOM utilizou-se o Matlab® na versão 16^a, onde definiu-se as variáveis necessárias do código: topologia, dimensão, passos e vizinhos. A topologia refere-se ao tipo de malha, que pode ser retangular ou hexagonal. A dimensão representa o tamanho da malha. Os vizinhos representam o raio de vizinhança de neurônios com os quais o neurônio vencedor irá se comunicar e os passos representam número de iterações por neurônio.

Diante disso, as definições das variáveis do código foram: para topologia optou-se pela malha hexagonal, por ser mais fácil sua visualização e também a mais

usadas nos trabalhos relacionados. As dimensões iniciais foram de 4x4 pois o banco de dados é relativamente pequeno, os vizinhos iguais a 1 e os passos igual a 400, podendo, na prática, haver alterações das variáveis com intenção de obter melhores resultados.

Ressalta-se que as dimensões iniciais escolhidas podem ser alteradas (aumentando a malha) para auxiliar na interpretação dos resultados e, considerando-se isso, a aplicação das duas técnicas objetiva o aprimoramento das correlações extraídas e facilita no entendimento da relação entre as variáveis estudadas.

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão exibidos os resultados individuais de cada etapa da caracterização da área de estudo, apresentada anteriormente, bem como os resultados e discussão das simulações e análises de correlação.

Há ressalva pela forma de apresentação dos resultados obtidos, pois a parte da caracterização da área e levantamento topográfico com características hidráulicas gerou várias informações que foram analisadas e dispostas da melhor forma possível.

1. ÁREA DE ESTUDO

As Figura 17 e 18 retratam a região de estudo do trecho estudado.

Figura 17 - Área de Estudo Google Earth



Fonte: Google Earth (2018).

Figura 18 - Área de Estudo

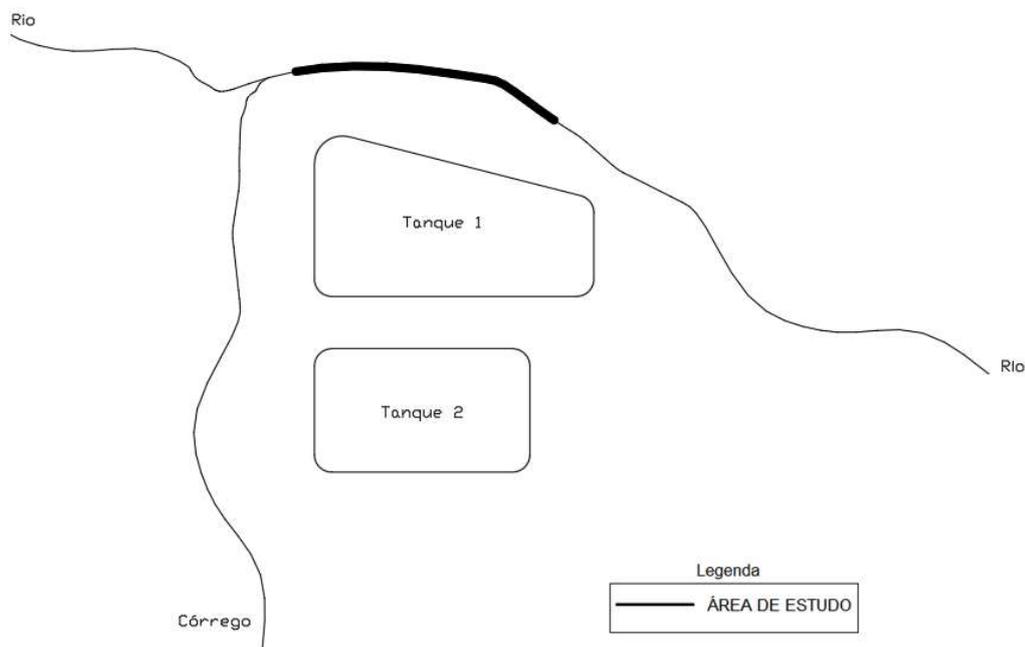


Fonte: Acervo do autor

Observam-se na Figura 18 estacas de madeira nas margens do curso d'água que auxiliaram no levantamento topográfico, perfil de velocidade e também nas coletas. Cada estaca foi nomeada de forma crescente, obedecendo os critérios apresentados na Figura 8.

Uma observação importante sobre a área de estudo é que o rio sofre uma confluência com um córrego oriundo de águas pluviais e dos tanques de pesca, como visto na Figura 19.

Figura 19 - Planta representativa da confluência entre o córrego e o rio.



Fonte: Acervo do Autor

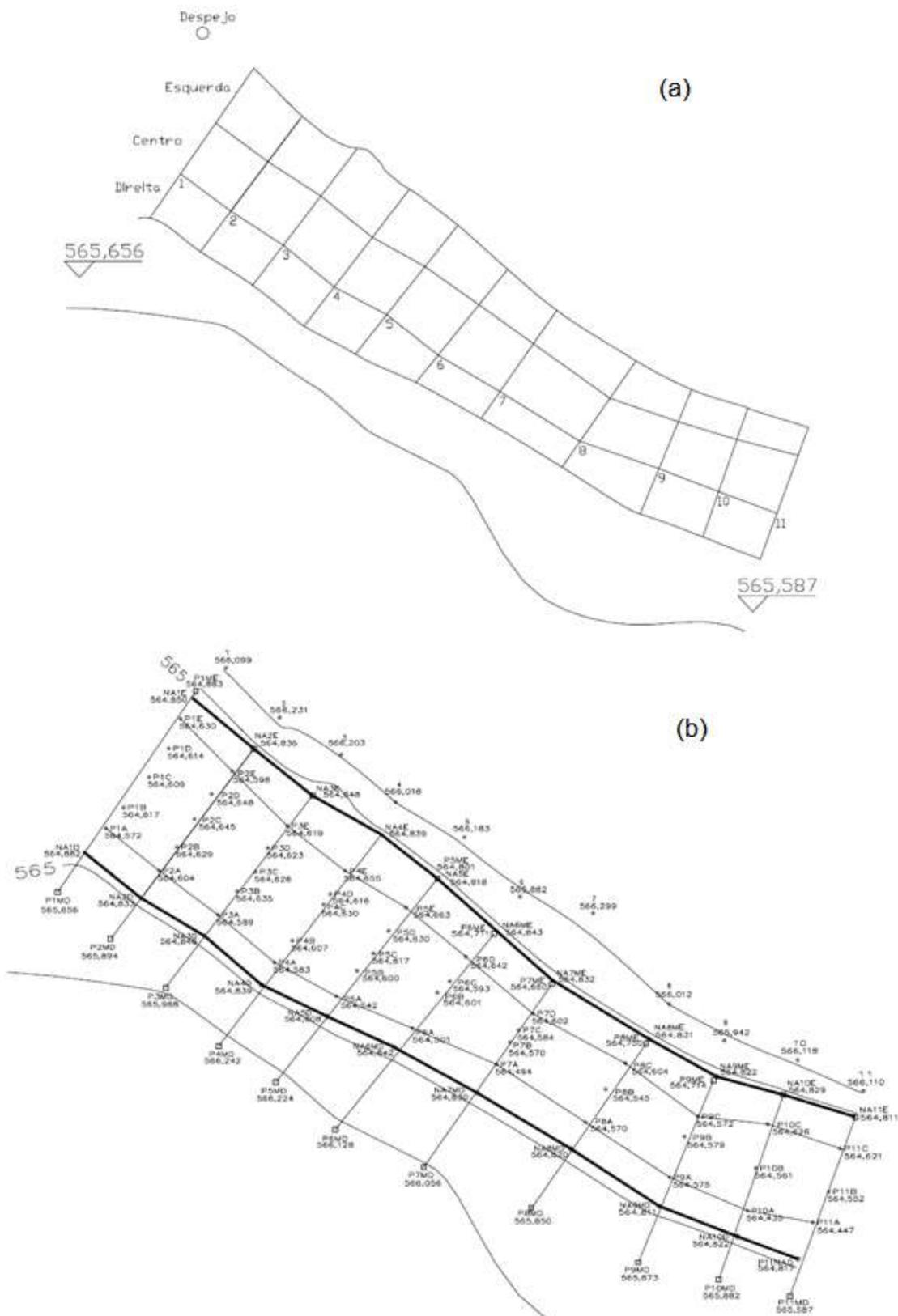
1.1 Levantamento Topográfico

O trecho estudado possui aproximadamente 20 metros de comprimento e aproximadamente 4 metros de largura em uma geometria irregular. O curso d'água foi separado em onze compartimentos, a contar do despejo.

Observa-se, Figura 20, que a geometria do rio é irregular, isso faz com que a variação da lâmina d'água nos pontos monitorados se altere ao longo do trecho estudado.

Os pontos de 1 ao 11 representam a divisão dos compartimentos para a caracterização dos mesmos. O compartimento 6 encontra-se no início de uma curvatura natural do rio.

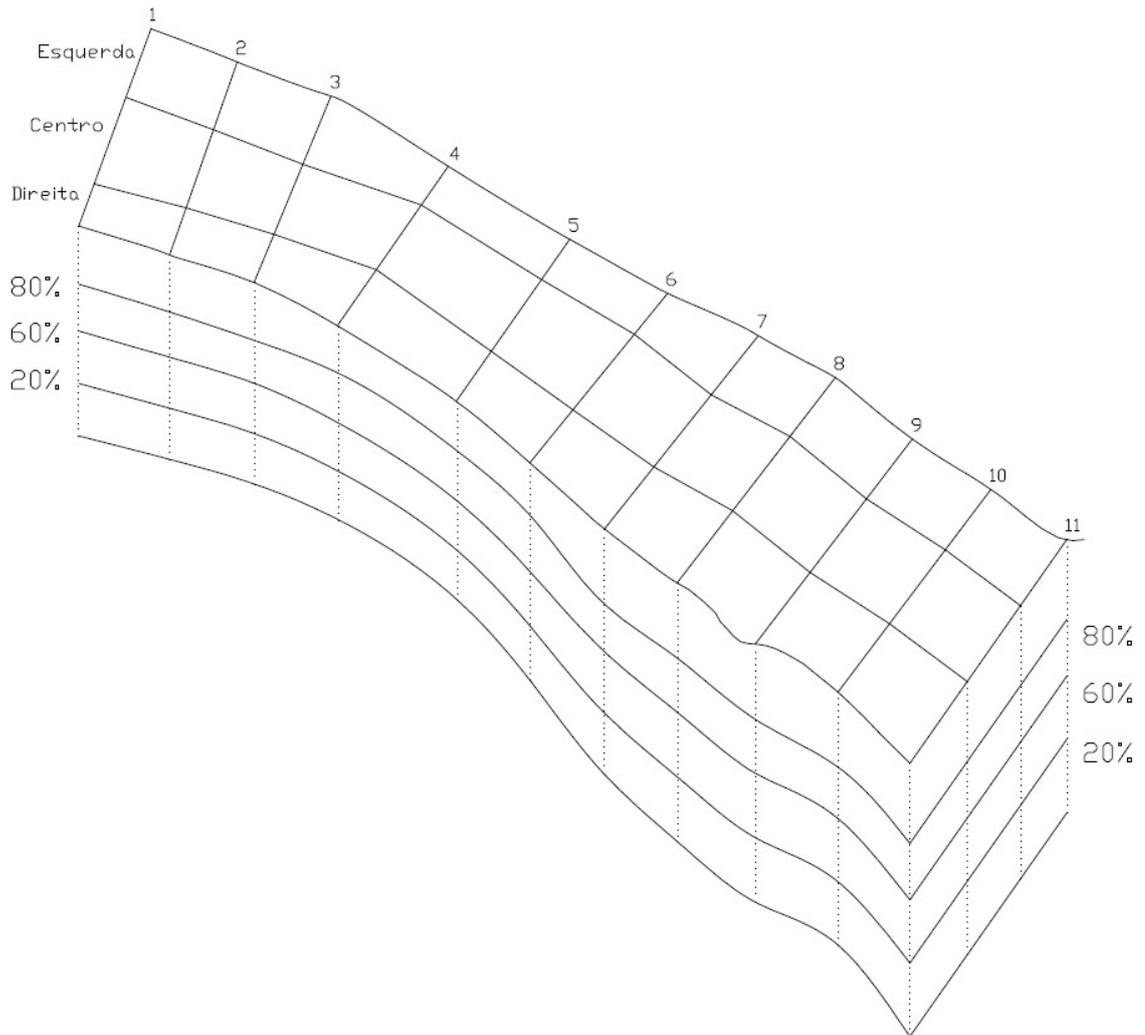
Figura 20 - Topografia do curso d'água: (a) sem cotas e (b) com cotas



Fonte: Acervo do autor.

A Figura 21 apresenta a divisão dos 11 compartimentos longitudinais das regiões (esquerda, centro e direita) e dos pontos de monitoramento de velocidade e de concentrações do poluente (20%, 60% e 80% de profundidade).

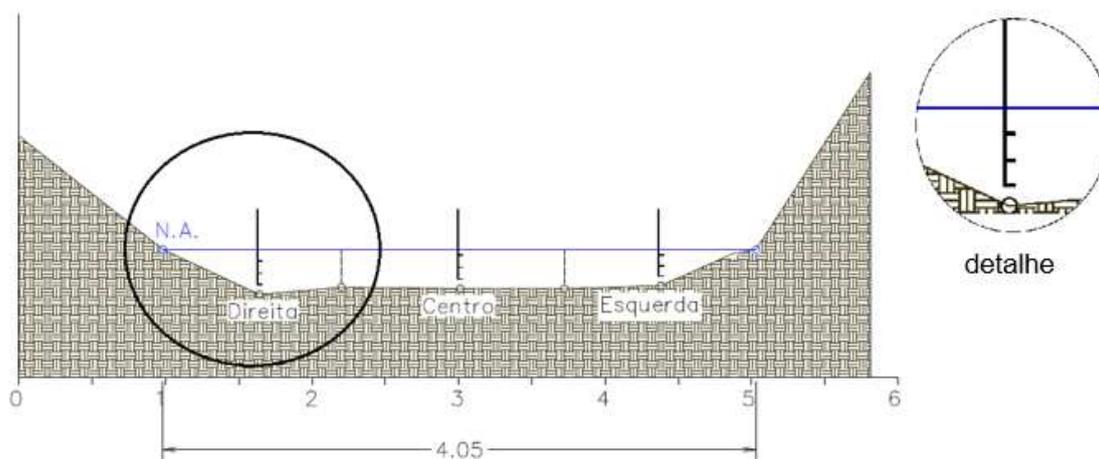
Figura 21 - Visão dos pontos de monitoramento



Fonte: Acervo do autor

A Figura 22 representa a topografia do compartimento 1. Observa-se, no detalhe, a forma como as profundidades em três níveis foram medidas e coletadas para, posteriormente, obter-se o perfil de velocidade e as amostras do NaCl.

Figura 22 - Levantamento Topográfico do Compartimento 1



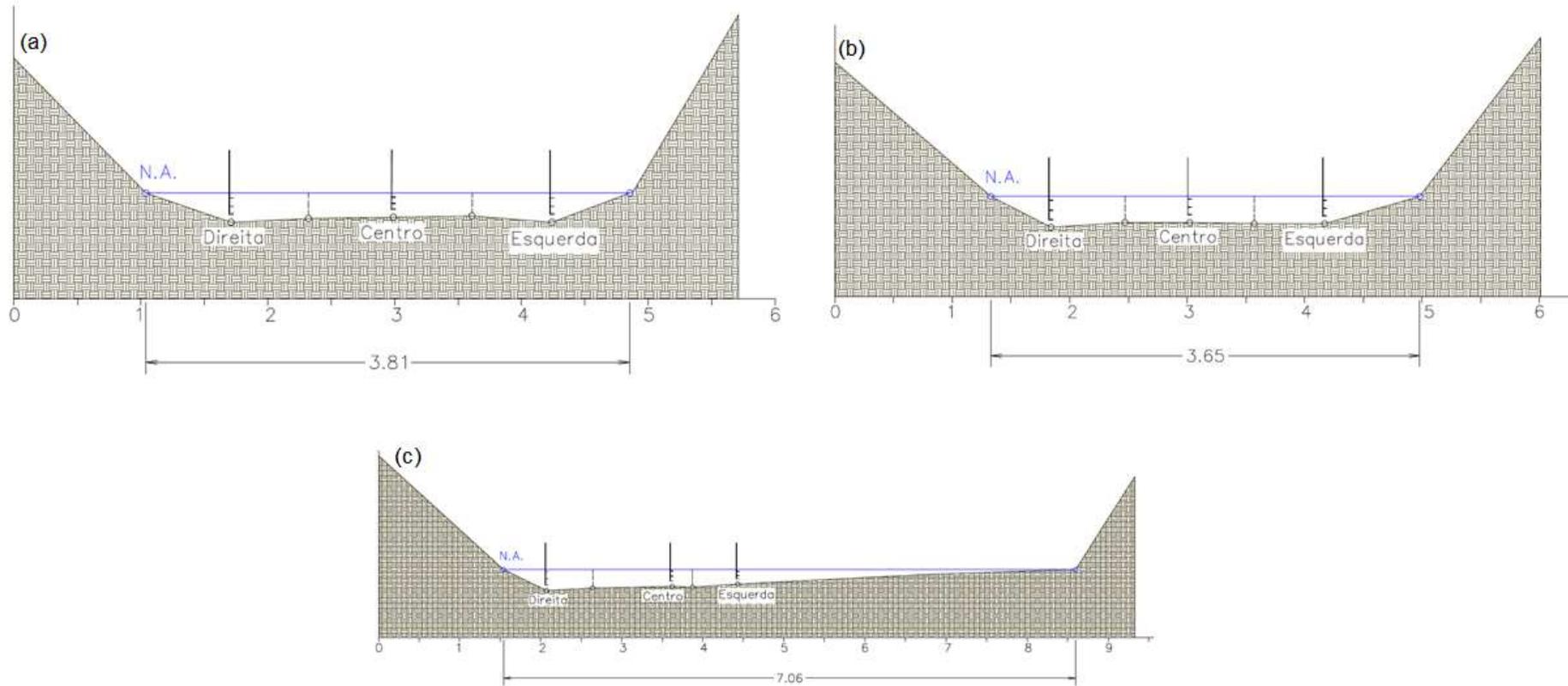
O compartimento 1 possui 4,05 metros de largura e a região central de monitoramento dispõe de um formato retangular. As regiões a margem do rio (direita e esquerda) possuem a mesma lâmina d'água, como visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Lâmina d'água do Compartimento 1

	Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento	
		(%)	(m)
DIREITA	0,21	80	0,168
		60	0,126
		20	0,042
CENTRO	0,20	80	0,160
		60	0,140
		20	0,040
ESQUERDA	0,21	80	0,168
		60	0,126
		20	0,042

A Figura 23 traz a topologia dos compartimentos 2, 3 e 4. Os compartimentos 2 e 3 (a e b, respectivamente na Figura 23) continuam com o padrão retangular na região central de monitoramento. A largura do rio diminuiu 0,40 metros entre o compartimento 1 e 3.

Figura 23 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 2 (a), 3 (b) e 4 (c).



O compartimento 4 (Figura 23c) teve um aumento significativo em sua largura, 7,06 metros, mas em relação a lâmina d'água a diferença não foi tão significativa, como vista na Tabela 2.

Tabela 2 - Lâmina d'água dos Compartimentos 2, 3 e 4.

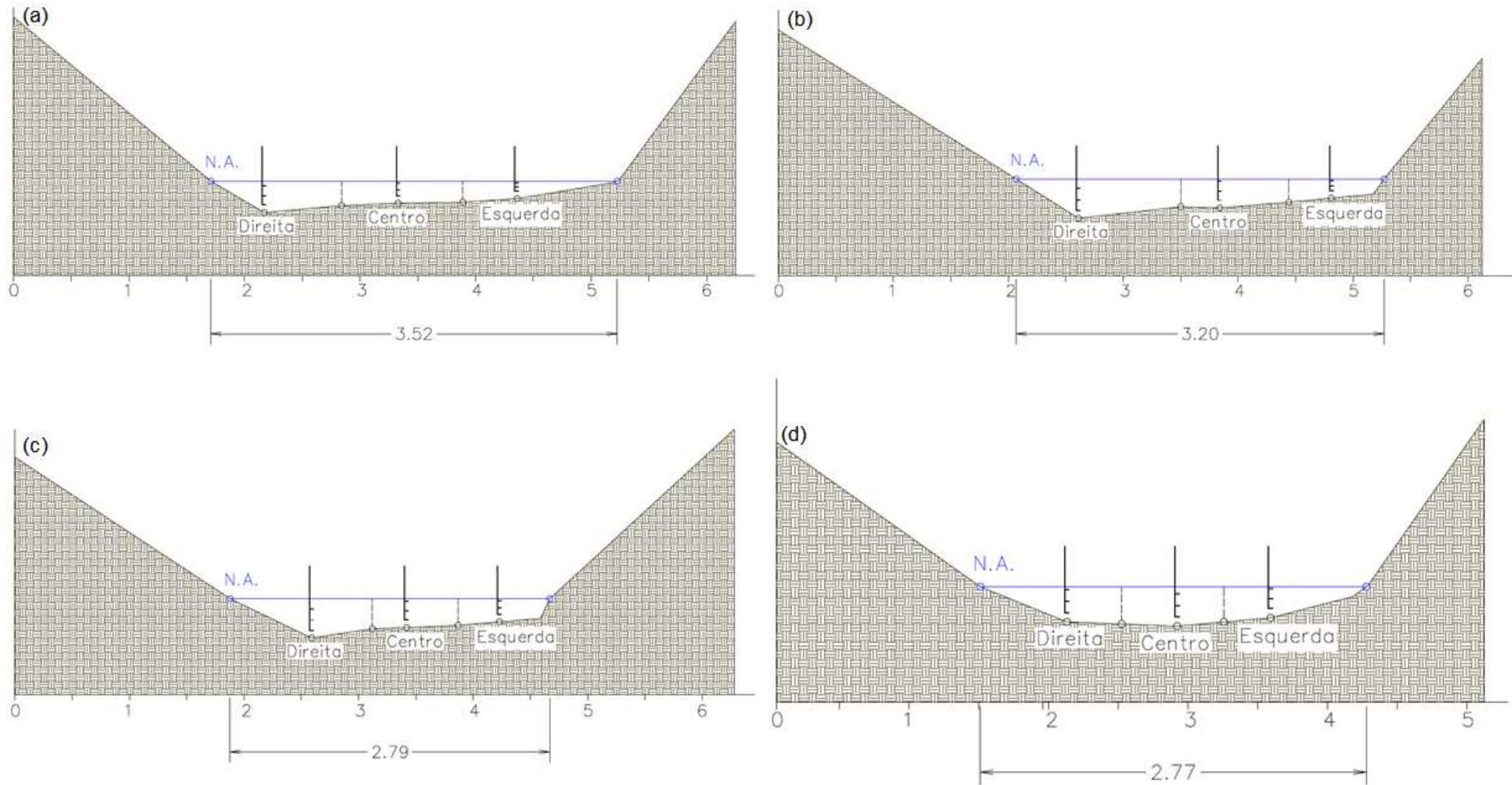
Compartimento 2			Compartimento 3			Compartimento 4		
	Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento (%) (m)		Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento (%) (m)		Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento (%) (m)
DIREITA	0,22	80	DIREITA	0,25	80	DIREITA	0,22	80
		0,176			0,200			0,176
		60			0,150			60
		0,044			20			0,044
CENTRO	0,20	80	CENTRO	0,21	80	CENTRO	0,19	80
		0,160			0,168			0,152
		60			0,126			60
		0,040			20			0,038
ESQUERDA	0,22	80	ESQUERDA	0,21	80	ESQUERDA	0,19	80
		0,176			0,168			0,152
		60			0,126			60
		0,044			20			0,038

A Figura 24 traz a caracterização topográfica dos compartimentos 5, 6, 7 e 8.

O compartimento 5 (Figura 24a) sofre um estreitamento de margem, atingindo uma largura de 3,52 metros. Já o compartimento 6 (Figura 24b) se encontra no início da curvatura natural do rio.

O compartimento 8 (Figura 24d) apresenta um estreitamento entre as margens se mantém, porém com a região central mais profunda.

Figura 24 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 5 (a), 6 (b), 7 (c) e 8 (d)



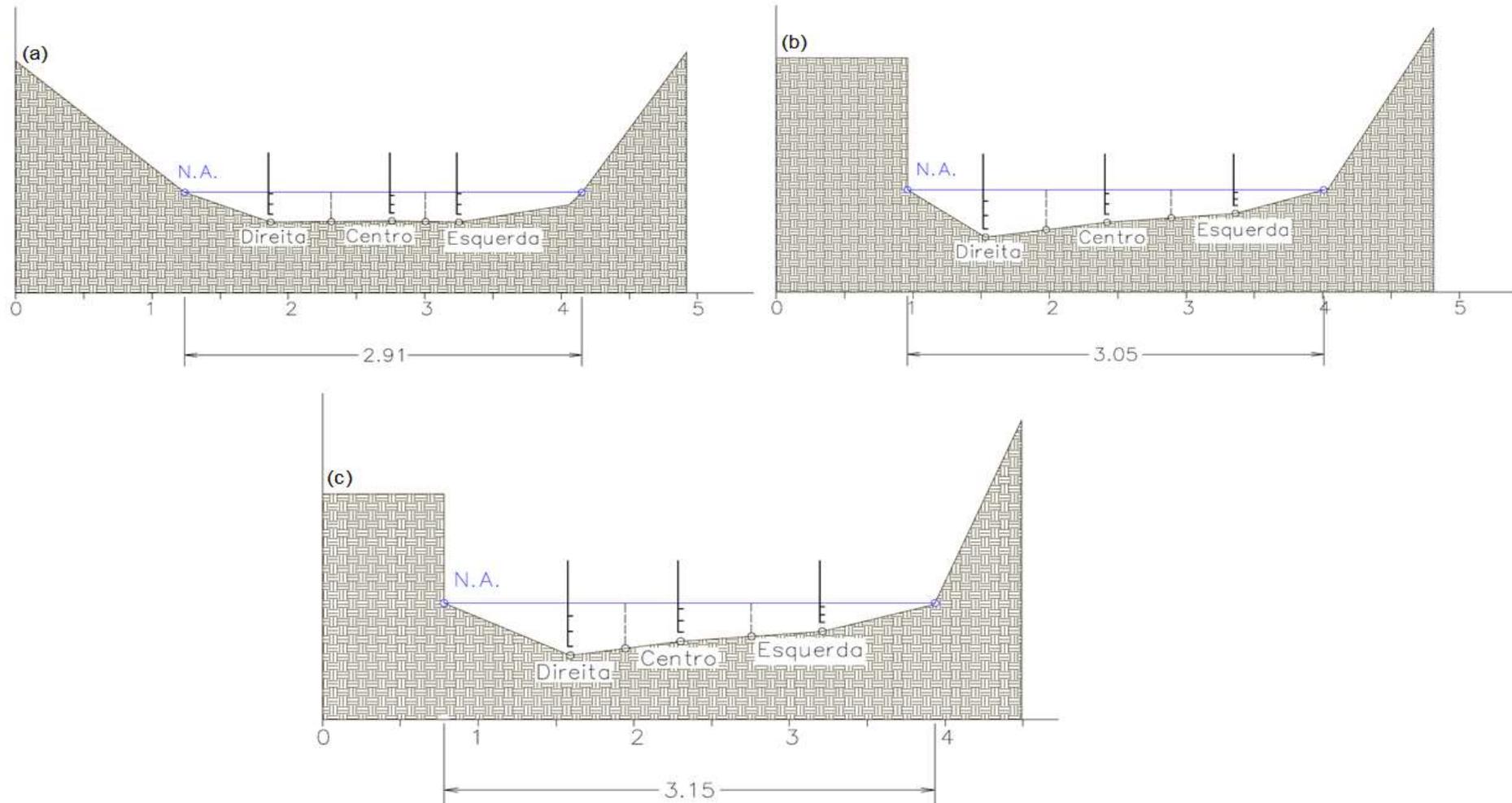
A lâmina d'água dos compartimentos 5, 6 e 7 são maiores na região de monitoramento à direita, e menores na região à esquerda, já, no compartimento 8, a maior lâmina se encontra na região central (Tabela 3).

Tabela 3 - Lâmina d'água dos Compartimentos 5, 6, 7 e 8

Compartimento 5				Compartimento 6			
	Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento			Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento	
		(%)	(m)			(%)	(m)
DIREITA	0,29	80	0,232	DIREITA	0,32	80	0,256
		60	0,174			60	0,192
		20	0,058			20	0,064
CENTRO	0,21	80	0,168	CENTRO	0,21	80	0,168
		60	0,126			60	0,126
		20	0,042			20	0,042
ESQUERDA	0,17	80	0,136	ESQUERDA	0,20	80	0,160
		60	0,102			60	0,120
		20	0,034			20	0,040
Compartimento 7				Compartimento 8			
	Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento			Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento	
		(%)	(m)			(%)	(m)
DIREITA	0,29	80	0,232	DIREITA	0,26	80	0,208
		60	0,174			60	0,156
		20	0,058			20	0,052
CENTRO	0,27	80	0,216	CENTRO	0,28	80	0,224
		60	0,162			60	0,168
		20	0,054			20	0,056
ESQUERDA	0,22	80	0,176	ESQUERDA	0,24	80	0,192
		60	0,132			60	0,144
		20	0,044			20	0,048

Na caracterização do compartimento 9 (Figura 25a), a topografia se mantém parecida com a topografia anterior, com ressalva na área de monitoramento da região à esquerda, já que a mesma possui uma lâmina d'água muito baixa perto da margem, precisando assim que o monitoramento seja feito mais perto da região central.

Figura 25 - Levantamento Topográfico dos Compartimentos 9 (a), 10 (b) e 11 (c)



Já no compartimento 10 (Figura b), o desnível presente na região à direita do compartimento aumenta 16cm, como visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Lâmina d'água dos Compartimento 9, 10 e 11

Compartimento 9			Compartimento 10			Compartimento 11					
	Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento			Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento			Lâmina (m)	Profundidade de monitoramento	
		(%)	(m)			(%)	(m)			(%)	(m)
DIREITA	0,19	80	0,152	DIREITA	0,35	80	0,280	DIREITA	0,30	80	0,240
		60	0,114			60	0,210			60	0,160
		20	0,038			20	0,070			20	0,040
CENTRO	0,26	80	0,208	CENTRO	0,26	80	0,208	CENTRO	0,24	80	0,192
		60	0,156			60	0,156			60	0,144
		20	0,052			20	0,052			20	0,052
ESQUERDA	0,29	80	0,208	ESQUERDA	0,20	80	0,160	ESQUERDA	0,19	80	0,152
		60	0,156			60	0,120			60	0,114
		20	0,052			20	0,040			20	0,038

Com o conhecimento topográfico da área de estudo, juntamente com os pontos de monitoramento já estabelecidos, foi possível conhecer o perfil de velocidade de cada compartimento.

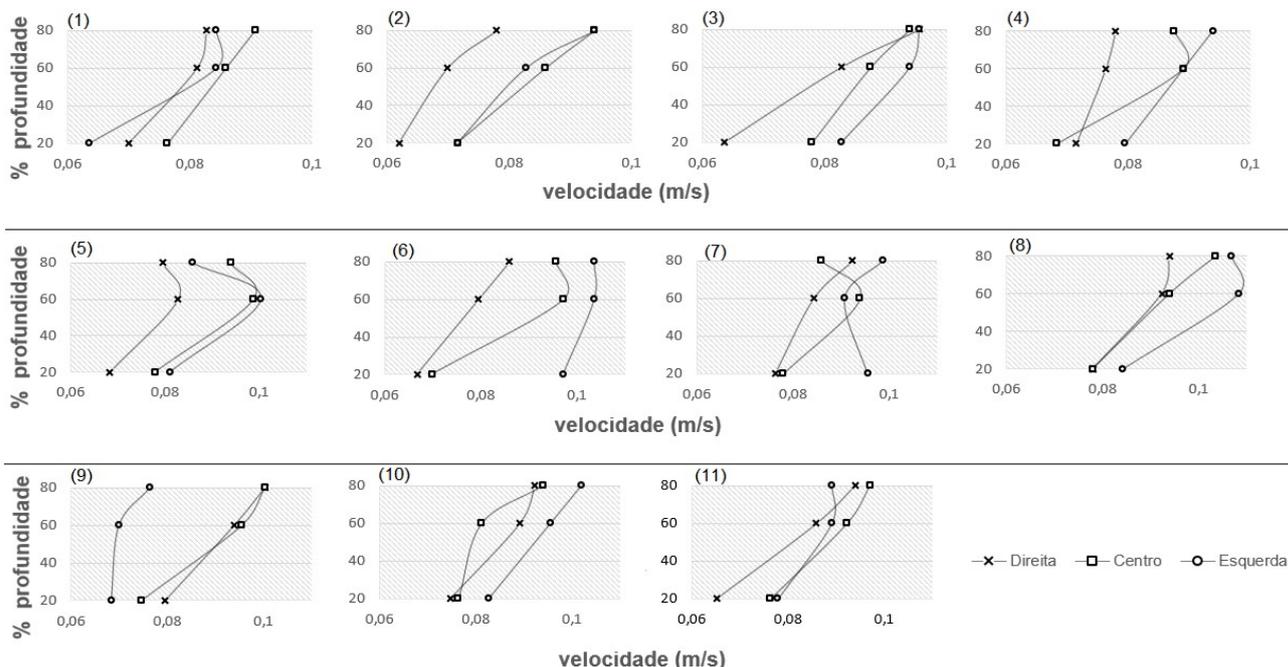
1.2 Perfil de Velocidade

As velocidades foram medidas a 20, 60 e 80% da altura da lâmina d'água do compartimento, ou seja, utilizando-se as profundidades de monitoramento expostas no item 1.1, capítulo 5.

A Figura 26 representa o perfil de velocidade nos 11 compartimentos, cujo intervalo variou entre 0,06 e 0,1 m/s.

As velocidades na região a direita foram as mais baixas entre o compartimento 1 até o 6, com ressalva no compartimento 3, onde as três regiões (direita, centro e esquerda) tiveram velocidades bem próximas na superfície do rio. No compartimento 9, os comportamentos da região a direita e central são bem parecidos, com velocidades maiores.

Figura 26 - Perfil de velocidade em todos os compartimentos



A região central, nos compartimentos 1, 2, 3, 4, 8, 9 e 11, manteve um comportamento onde sua maior velocidade estava na superfície do rio.

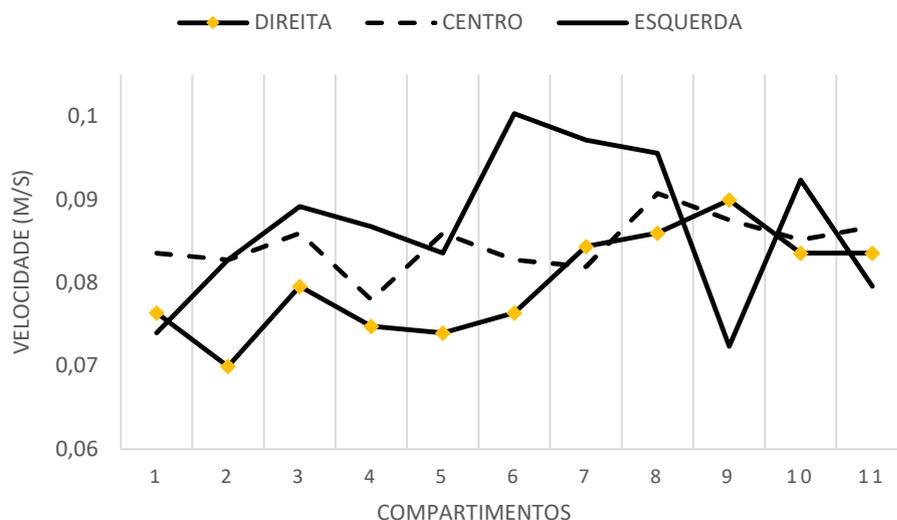
Já no monitoramento a esquerda as maiores velocidades foram vistas nos compartimentos 6, 8 e 10.

O compartimento 5 apresentou um padrão de comportamento entre as regiões (direita, centro e esquerda) e o níveis (20, 60 e 80% da lâmina), apresentando velocidade a 60% maior nas 3 regiões.

A Figura 27 retrata o perfil de velocidade por região, onde observa-se que a região a esquerda tem uma predominância em velocidades maiores, com exceção do ponto 9, onde a velocidade tem uma queda.

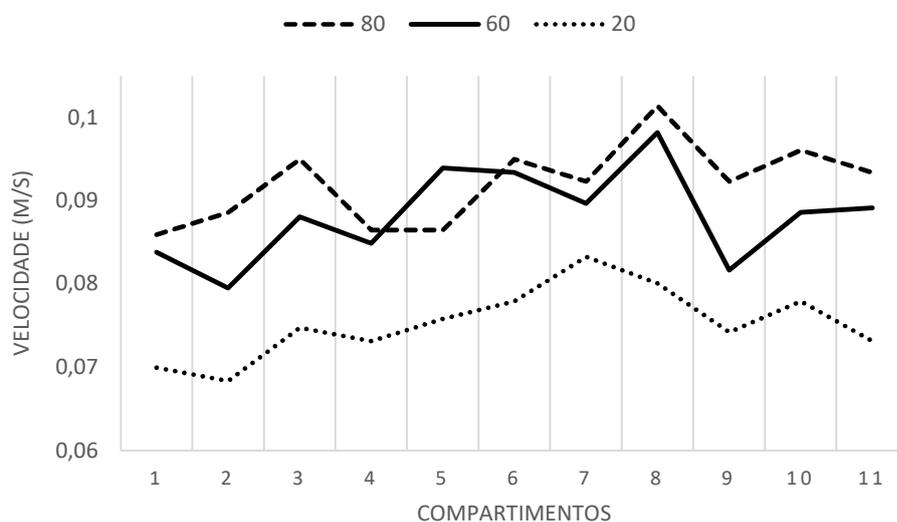
Já a região central manteve um padrão de comportamento durante os 11 compartimentos. Na região à direita, a velocidade começa mais baixa e vai subindo gradativamente, até atingir seu maior valor no compartimento 9 para posteriormente começar a diminuir.

Figura 27 - Comportamento da Velocidade nas Regiões Direita, Centro e Esquerda



As velocidades por níveis de profundidade podem ser observadas na Figura 28, onde os níveis a 20% da lâmina d'água se mantiveram em menor velocidade no decorrer dos compartimentos.

Figura 28 - Comportamento da Velocidade nos níveis de profundidade



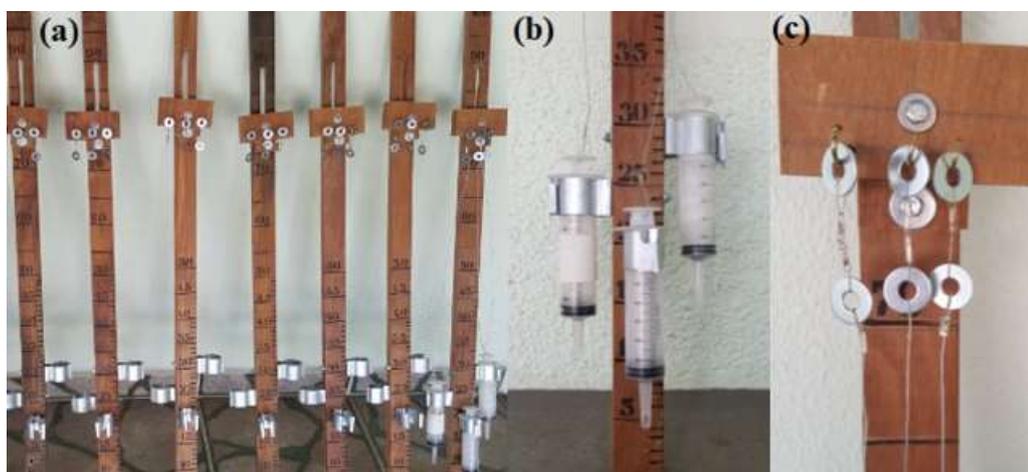
Já os níveis a 60% e 80% da lâmina tiveram um comportamento parecido no quesito picos e quedas de velocidade. Ao observar os compartimentos 4, 7 e 9,

verifica-se que os níveis tiveram uma queda de velocidade e, nos compartimentos 3 e 8, as velocidades aumentaram.

2. COLETAS

Para a realização das coletas, foram desenvolvidos coletores em três níveis de coletas, onde pode-se ver em detalhe na Figura 29 a estrutura da estaca de madeira graduada, fixação das seringas e o puxador.

Figura 29 - Coletores: (a) coletores (b) seringas (c) puxador



Fonte: Acervo do autor

Na Figura 29 (a) é possível visualizar os coletores inteiros e na Figura 29 (b) é possível visualizar as seringas que serviram como coletores, como eram adaptadas ao usar uma braçadeira fixa e onde as seringas ficavam móveis afim de garantir a variação nas alturas de coleta nas três posições. As seringas eram presas a um fio de aço que as ligava até um puxador de madeira (Figura 29 (c)), que auxiliava o momento da coleta. Na Figura 30 é possível ver o momento de uma das coletas.

Figura 30 - Coleta: (a) compartimento 3 (b) entrega da amostra



Fonte: Acervo do Autor

A Figura 31 mostra o armazenamento das amostras no ambiente das coletas. As amostras foram armazenadas em coletores universais, com identificação do número do teste, compartimento, posição e altura.

Figura 31 - Coletores Universais identificados



Fonte: Acervo do Autor

Utilizando a curva de calibração (Equação 20) foi possível quantificar os valores de concentração do NaCl em todos os 99 pontos de monitoramento. Foram realizadas 4 coletas. Na Tabela 5 seguem apresentadas as médias das concentrações do traçador utilizado.

Tabela 5 - Concentração Resultante de NaCl

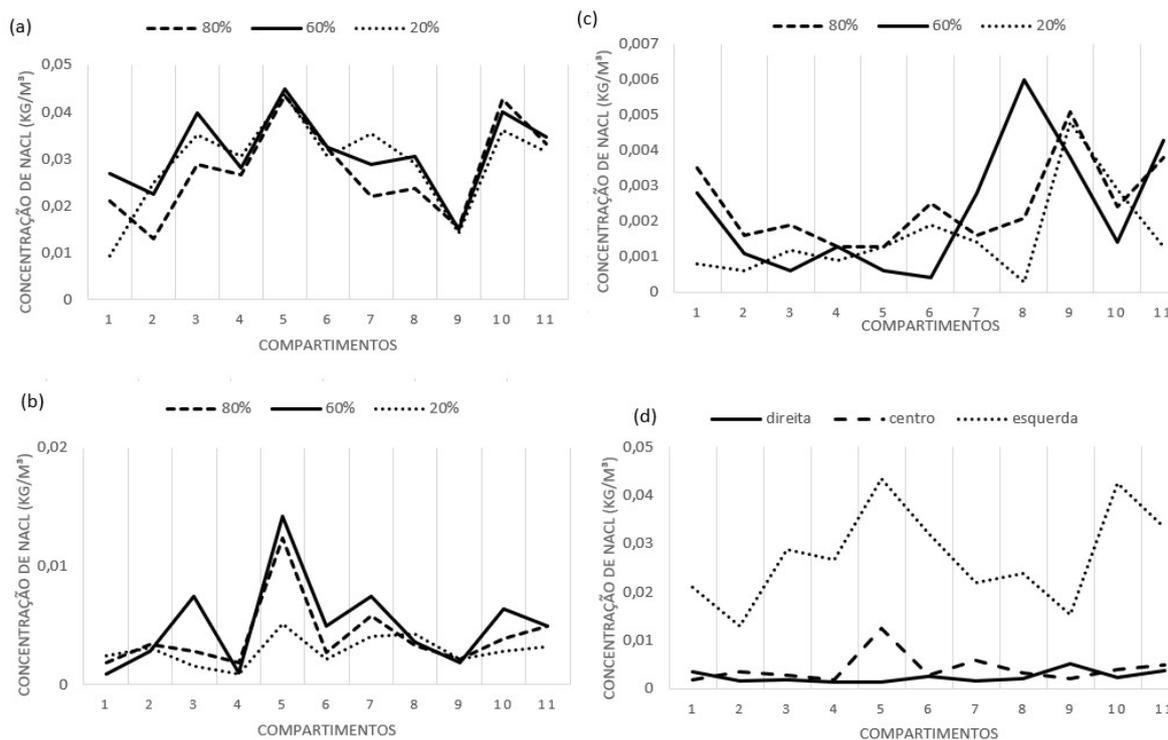
TESTE 4: CONCENTRAÇÃO INICIAL = 0,03798 KG/M³

COMP.	DIREITA			CENTRO			ESQUERDA		
	80%	60%	20%	80%	60%	20%	80%	60%	20%
1	0,0035	0,0028	0,0008	0,0019	0,0009	0,0024	0,0209	0,0268	0,0093
2	0,0016	0,0011	0,0006	0,0034	0,0028	0,0031	0,0129	0,0224	0,0249
3	0,0019	0,0006	0,0012	0,0028	0,0074	0,0016	0,0287	0,0398	0,0351
4	0,0013	0,0013	0,0009	0,0019	0,0010	0,0009	0,0267	0,0281	0,0306
5	0,0013	0,0006	0,0013	0,0124	0,0142	0,0051	0,0434	0,0449	0,0437
6	0,0025	0,0004	0,0019	0,0027	0,0049	0,0021	0,0322	0,0325	0,0304
7	0,0016	0,0028	0,0014	0,0058	0,0074	0,0041	0,0219	0,0288	0,0354
8	0,0021	0,0060	0,0030	0,0033	0,0036	0,0043	0,0238	0,0305	0,0291
9	0,0051	0,0038	0,0048	0,0021	0,0019	0,0021	0,0154	0,0149	0,0142
10	0,0024	0,0014	0,0029	0,0039	0,0064	0,0028	0,0426	0,0399	0,0362
11	0,0038	0,0043	0,0013	0,0049	0,0049	0,0032	0,0332	0,0346	0,0316

As concentrações resultantes foram extraídas a partir da concentração coletada menos a concentração inicial.

As concentrações apresentadas na Tabela 5, são visualizadas na Figura 32.

Figura 32 - Comportamento das Concentrações nas Regiões Monitoradas: (a) esquerda, (b) centro, (c) direita, (d) superfície



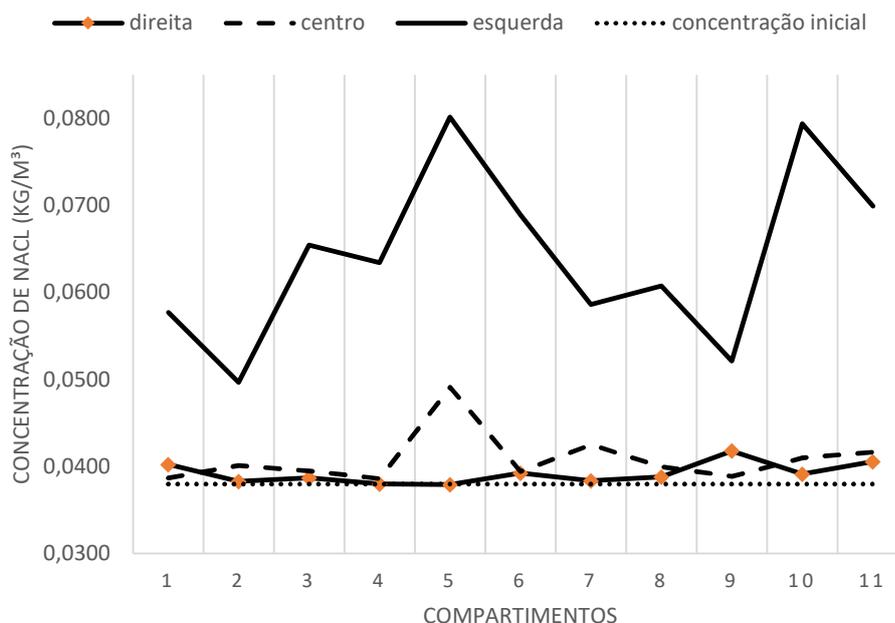
O comportamento da concentração nas regiões a esquerda (Figura 32a) atinge o pico simultaneamente em 20%, 60% e 80% no compartimento 5 e observa-se que as alturas começam a ter o mesmo comportamento a partir do compartimento 8.

Já na região central (Figura 32b), o pico de concentração também ocorre no compartimento 5. Na região à direita (Figura 32c) o pico ocorre entre os compartimentos 8 e 9.

A Figura 32d retrata o comportamento da concentração nos 11 compartimentos, na superfície do rio (altura de 80% da lâmina).

A região à direita se manteve em equilíbrio em relação ao comportamento da concentração (Figura 33), a região central atingiu sua maior concentração no compartimento 5.

Figura 33 - Comportamento da Concentração Resultante



A região a esquerda teve suas maiores concentrações nos compartimentos 5 e 10, e suas menores concentrações nos compartimentos 2 e 8. O entendimento visual desse comportamento é necessário para a modelagem matemática, visto que é através dele que a interação entre as regiões (esquerda, central e direita) será estabelecida.

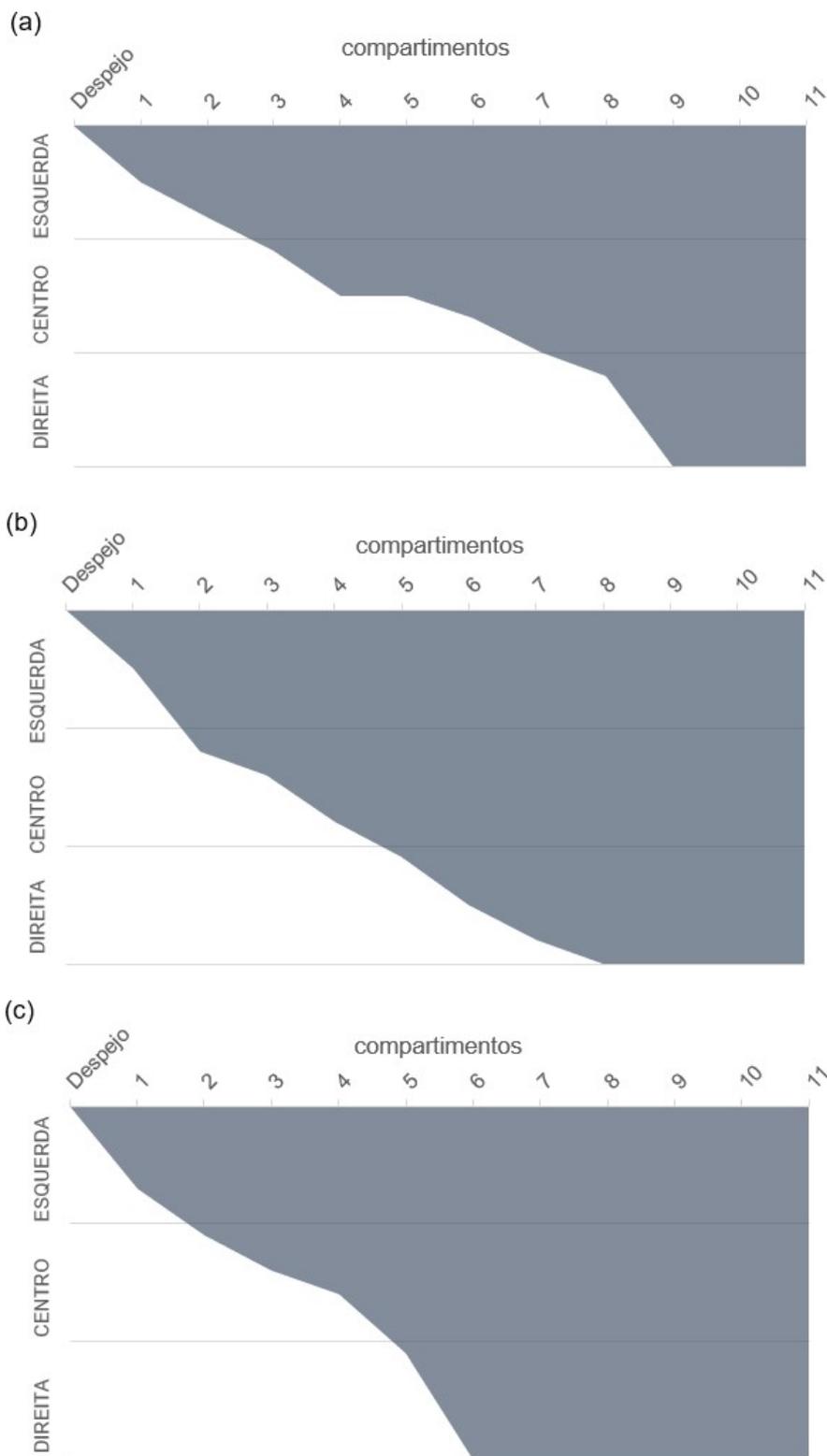
A média de tempo de coleta entre um compartimento e outro foi de aproximadamente um minuto e vinte e cinco segundos. Do lançamento do poluente até atingir o compartimento 11 foram cerca de um minuto e dez segundos, totalizando quinze minutos entre o despejo e todas as coletas.

3. FORMAÇÃO DA PLUMA

A pluma é resultante do despejo realizado no curso d'água e representa como o meio se comporta ao receber uma carga poluidora. A Figura 34 expressa a formação da pluma nas três alturas monitoradas (20%, 60% e 80%). A formação da pluma refere-se ao momento que as seções e compartimentos recebem o traçador, com duração de 15 minutos.

Verifica-se, na Figura 34, os compartimentos onde ocorrem a zona de mistura e a zona de mistura completa. A diferença entre as zonas está no processo que ocorre em cada compartimento, na zona de mistura ocorre o processo de dispersão de áreas mais concentradas para áreas menos concentradas, além do processo de decomposição do poluente. Já na zona de mistura completa, ocorre o processo citado quando o poluente atinge a margem paralela ao despejo, concluindo-se que a partir desse ponto a dispersão torna-se desprezível.

Figura 34 - Formação das plumas: (a) 20% (b) 60% (c) 80%



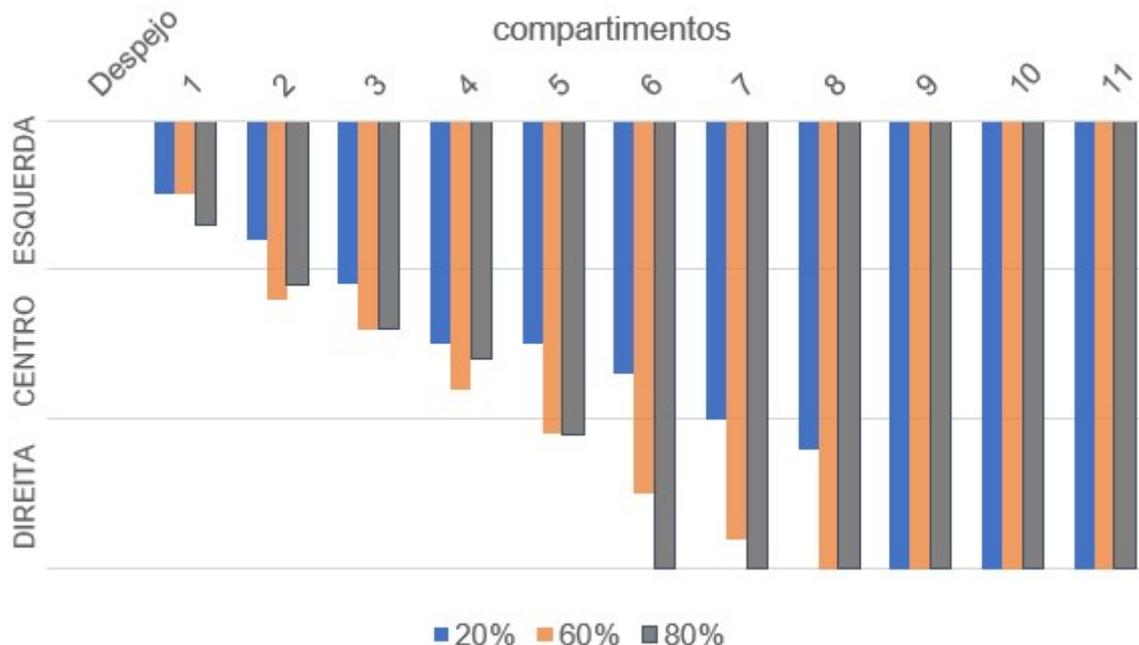
Com base nas considerações referentes à Figura 34, no monitoramento a 20% da lâmina d'água, observamos que o poluente se mantém na margem do despejo até o compartimento 2. Entre os compartimentos 3 e 7 o contaminante atinge a seção central. Após consideradas as observações nestes compartimentos, o poluente já caminha para a margem paralela ao despejo (do 8 ao 11), de maneira que se aponta que a zona de mistura para a lâmina de 20% ocorre entre o despejo e o compartimento 9 e obtendo a zona de mistura completa.

Já no monitoramento a 60%, o poluente se mantém na esquerda apenas no compartimento 1, no segundo compartimento já foi coletado contaminante, isso refere-se ao processo de decaimento do traçador, cuja velocidade transversal é maior na região central do curso d'água. Nesse monitoramento a zona de mistura ocorre entre o despejo e o compartimento 8, após atinge a zona de mistura completa, mas nota-se que ainda com dispersões significativas, ou seja, o comprimento do trecho estudado não foi suficiente para se visualizar a pluma a 60% da lâmina d'água.

Na lâmina 80% a zona de mistura ocorre do despejo ao compartimento 6, e após atinge a zona de mistura completa. O monitoramento superficial é o mais fácil de se entender justamente porque junto com o traçador houve despejo do corante que facilita a observação.

O monitoramento possibilitou o entendimento das zonas de mistura e zona de mistura completa (Figura 35), pois conforme a coleta é realizada, o resultado amostral pode representar processo de formação da pluma. Além disso, adquiriu-se com essas análises que a mistura completa ocorreu a partir do compartimento 6, a aproximadamente 9 metros do despejo.

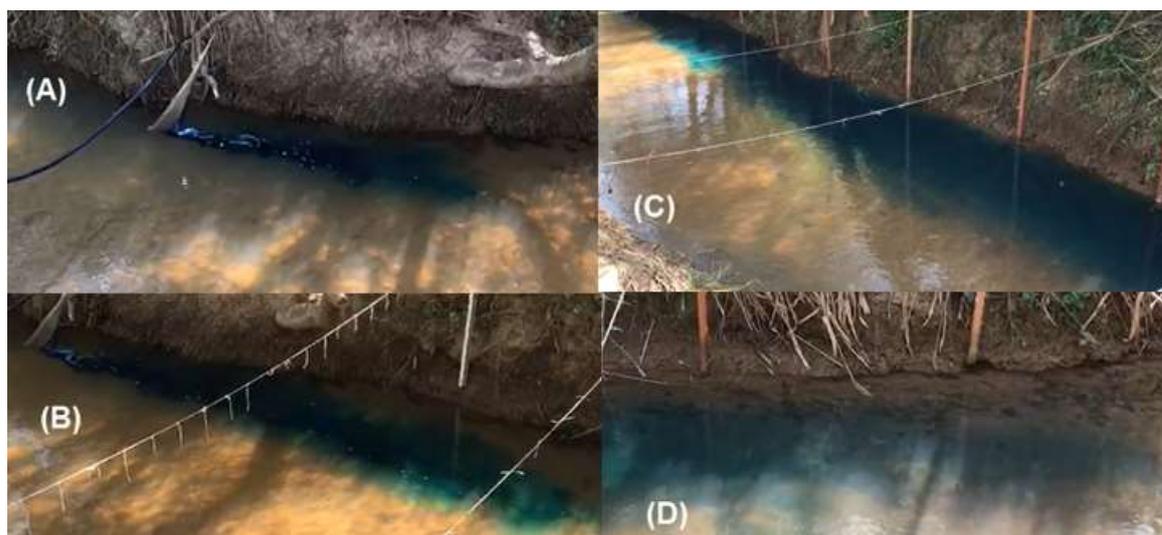
Figura 35 - Formação da Pluma nas Regiões de Monitoramento



Na Figura 36 (A) é possível visualizar o momento do despejo., na Figura 36 (B) verifica-se o momento em que o traçador toca o compartimento 2, na Figura 36 (C) o momento que o traçador atinge o compartimento 7 e, por fim, na Figura 36 (D), quando alcança o último compartimento.

Nota-se a diferença de tonalidade entre o despejo e no compartimento 11, e o índice dispersivo, que é restrito no início na margem esquerda e aos poucos vai atingindo outras regiões, como central e direita.

Figura 36 - Imagens da Filmagem do despejo do contaminante



Com base nas observações referentes ao monitoramento, utilizou-se as Equações 19, 20 e 21, que calcula o comprimento da zona advectiva (Tabela 6), para comparar com o monitoramento e o amostral.

Tabela 6 - Comprimento advectivo

EQUAÇÃO	COMPRIMENTO ADVECTIVO (M)	COMPARTIMENTO REFERENTE
19	11,7	Entre 6 e 7
20	46,7	Fora da área de estudo
21	1,5	1

A Equação 19, para o cenário estudado, melhor representa o comprimento advectivo, já que o calculado é muito próximo ao observado pela formação da pluma. Diante destas considerações, a zona de mistura ocorre entre o despejo e compartimento 6, ou seja, em 11,7 metros o contaminante lançado na margem esquerda atinge a margem direita, com as características hidráulicas expostas. A partir desse ponto inicia-se zona de mistura completa.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

4.1 Mensuração dos parâmetros

Conforme exposto no subitem 8.1 do capítulo IV, os parâmetros utilizados para a modelagem foram devidamente mensurados. Os valores de concentração futura e concentração utilizados foram listados no Tabela 5. Já os valores de fluxo do rio e volume estão detalhados na Tabela 7.

Tabela 7 - Volume e Fluxo dos Compartimentos

COMPARTIMENTO	CONDIÇÃO INICIAL (KG/M ³)	FLUXO POR COMPARTIMENTO (M ³ /S)	VOLUME POR COMPARTIMENTO (M ³)
D1	0,0379	0,0213	0,4095
C1	0,0379	0,0244	0,4350
E1	0,0379	0,0211	0,4095
D2	0,0379	0,0185	0,3949
C2	0,0379	0,0241	0,4308
E2	0,0379	0,0218	0,3949
D3	0,0379	0,0222	0,4124
C3	0,0379	0,0263	0,4567
E3	0,0379	0,0210	0,3465
D4	0,0379	0,0381	0,7805
C4	0,0379	0,0357	0,6740
E4	0,0379	0,0499	0,8792
D5	0,0379	0,0245	0,4743
C5	0,0379	0,0252	0,4152
E5	0,0379	0,0167	0,2780
D6	0,0379	0,0238	0,4625
C6	0,0379	0,0184	0,3154
E6	0,0379	0,0162	0,2403
D7	0,0379	0,0293	0,6781
C7	0,0379	0,0186	0,4209
E7	0,0379	0,0167	0,3430
D8	0,0379	0,0229	0,5780
C8	0,0379	0,0206	0,4980
E8	0,0379	0,0240	0,5335
D9	0,0379	0,0173	0,4088
C9	0,0379	0,0188	0,4475
E9	0,0379	0,0223	0,6713
D10	0,0379	0,0108	0,3435

Continuação Tabela 7

COMPARTIMENTO	CONDIÇÃO INICIAL (KG/M ³)	FLUXO POR COMPARTIMENTO (M ³ /S)	VOLUME POR COMPARTIMENTO (M ³)
C10	0,0379	0,0257	0,5270
E10	0,0379	0,0168	0,3092
D11	0,0379	0,0307	0,4746
C11	0,0379	0,0170	0,2531
E11	0,0379	0,0179	0,2881

4.1.1 Cálculo do decaimento

A variável decaimento pode ser calculada nesse estudo, visto que, através da Equação 23, com as demais variáveis mensuradas, o decaimento torna-se a única incógnita da equação.

Devido a isso, foi possível mensurar o decaimento para cada compartimento, como visto na Tabela 8. A média de decaimento na área de estudo foi de 0,0036 s⁻¹.

Tabela 8 - Decaimento por Compartimento

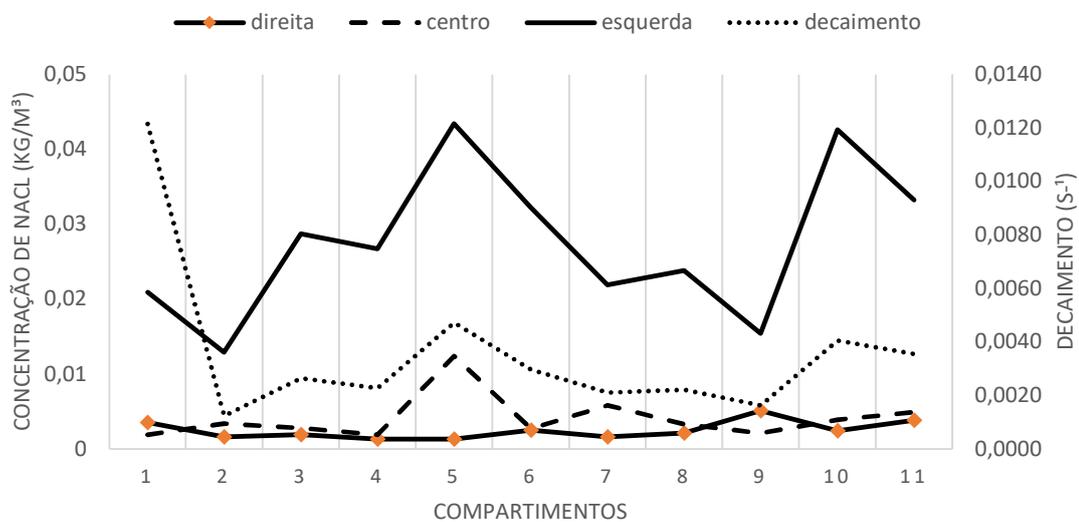
COMPARTIMENTO	DECAIMENTO (S ⁻¹)
D1	0,0011
C1	0,0007
E1	0,0346
D2	0,0000
C2	0,0005
E2	0,0032
D3	0,0003
C3	0,0005
E3	0,0072
D4	0,0000
C4	0,0001
E4	0,0067
D5	0,0000
C5	0,0029
E5	0,0113
D6	0,0001
C6	0,0004
E6	0,0083
D7	0,0000
C7	0,0009
E7	0,0054

Continuação Tabela 8

COMPARTIMENTO	DECAIMENTO (S ⁻¹)
D8	0,0001
C8	0,0004
E8	0,0061
D9	0,0009
C9	0,0002
E9	0,0037
D10	0,0001
C10	0,0010
E10	0,0110
D11	0,0010
C11	0,0011
E11	0,0086

A Figura 37 traz o comportamento das concentrações no decorrer dos compartimentos relacionado com os valores de decaimentos, respectivamente.

Figura 37 - Concentrações e Decaimentos



4.2 A Modelagem matemática

Considerando os canais à direita (D), central (C) e à esquerda (E), a formulação matemática é dada pelo seguinte sistema (Equação 27):

$$\begin{cases} D_1(n+1) = D_1(n) \left(1 - \frac{FD_1}{VD_1} - R\right) \\ C_1(n+1) = C_1(n) \left(1 - \frac{FC_1}{VC_1} - R\right) \\ E_1(n+1) = E_1(n) \left(1 - \frac{FE_1}{VE_1} - R\right) + q \end{cases} \quad \text{Equação 27}$$

onde:

- $D_1(n)$, $C_1(n)$ e $E_1(n)$ referem-se à concentração do poluente no tempo n , na seção à direita, central e à esquerda do compartimento 1, respectivamente;
- $D_1(n+1)$, $C_1(n+1)$ e $E_1(n+1)$ referem-se à concentração do poluente no tempo $n+1$, na seção à direita, central e à esquerda do compartimento 1, respectivamente;
- FD_1 , FC_1 e FE_1 representam o fluxo na seção à direita, central e à esquerda no compartimento 1, respectivamente;
- VD_1 , VC_1 e VE_1 , indicam o volume na seção à direita, central e à esquerda no compartimento 1, respectivamente;
- R refere-se ao decaimento do poluente;
- q representa o aporte que ocorre apenas no compartimento 1, sendo considerado nulo nos demais compartimentos.

Nota-se que a seção 1 à esquerda (equação 27) é a única a somar o aporte, justamente porque o despejo ocorreu pela margem esquerda, nesta seção. Nos compartimentos seguintes, a contribuição de poluente é feita pelo fluxo que entra do respectivo compartimento anterior, seguindo o sistema (Equação 28), com $i = 1, 2, \dots, 10$:

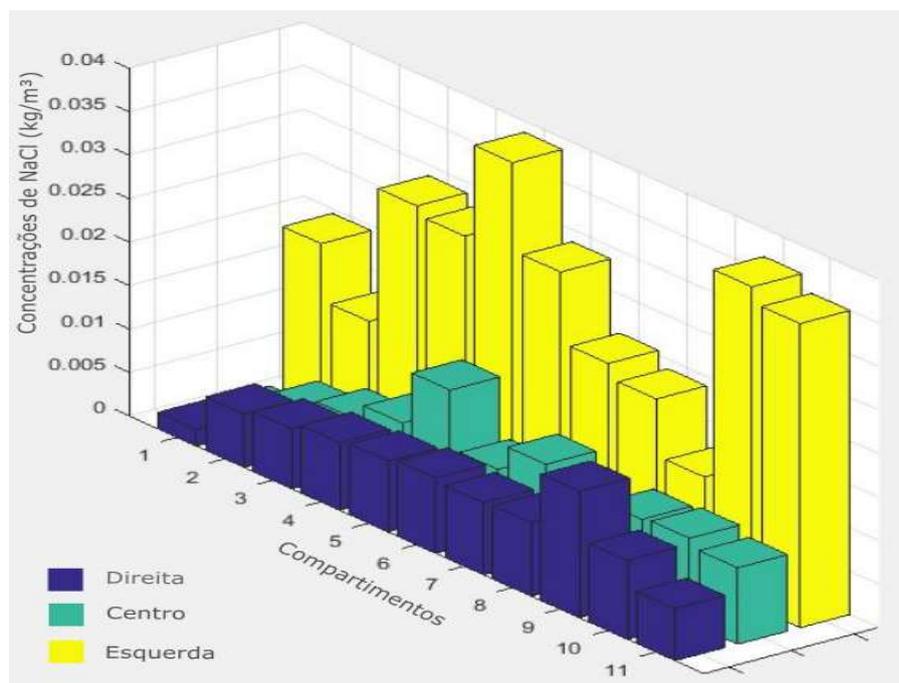
$$\begin{cases} D_{1+i}(n+1) = D_{1+i}(n) \left(1 - \frac{FD_{1+i}}{VD_{1+i}} - R\right) + \frac{FD_i}{VD_i} \\ C_{1+i}(n+1) = C_{1+i}(n) \left(1 - \frac{FC_{1+i}}{VC_{1+i}} - R\right) + \frac{FC_i}{VC_i} \\ E_{1+i}(n+1) = E_{1+i}(n) \left(1 - \frac{FE_{1+i}}{VE_{1+i}} - R\right) + \frac{FE_i}{VE_i} \end{cases} \quad \text{Equação 28}$$

Com as equações modeladas, foi possível fazer as simulações que tiveram por objetivo avaliar as concentrações do poluente em cada compartimento, evolutivo

no tempo, de acordo com o comportamento das plumas de poluentes no rio quando o mesmo recebe uma carga poluidora.

Com base nas observações e descrições citadas tem-se as simulações apresentado $n = 1 : 900$ (que representa o tempo das coletas, em segundos) (Figura 38).

Figura 38 - Comportamento da Concentração: Simulação



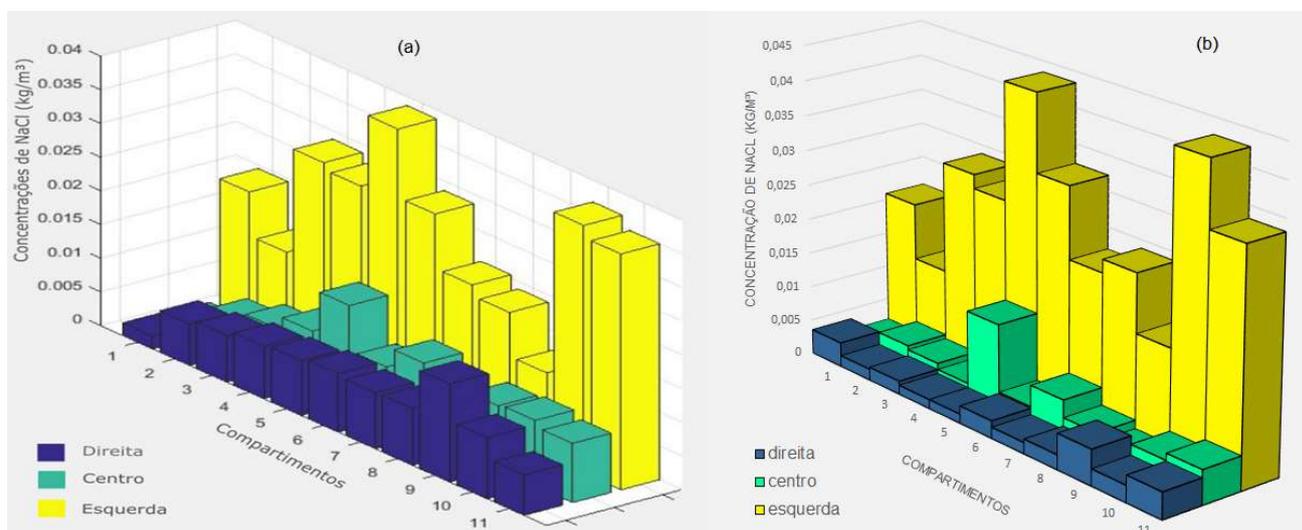
Na Figura 38 o comportamento de concentração nas regiões de monitoramento (direita, centro e esquerda) são diferentes. Ao observar cada região individualmente, nota-se que a região a direita se manteve em equilíbrio até atingir sua maior concentração no compartimento 9. Verifica-se que o contaminante despejado na margem esquerda do curso d'água atingiu a margem direita no compartimento 9, afirmação essa comprovada pela formação da pluma discutida no item 3 deste capítulo.

Na região central, o pico de concentração na simulação ocorreu no compartimento 5, afirmação também comprovada através das coletas realizadas e

esboçadas na Figura 33 (vide página 64). Por fim, ao observar a região à esquerda, os picos de concentração na simulação ocorreram nos compartimentos 5 e 10. Verifica-se que a concentração vai variando com o passar dos compartimentos, o que se dá devido à zona de mistura, onde o corpo receptor entra em equilíbrio com a carga recebida, dispersando o contaminante a partir do momento que o mesmo atinge a margem paralela ao despejo.

A comparação entre o comportamento de valor de concentração medido e o comportamento simulado pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 - Comportamento da Concentração: (a) Simulada (b) Coletada



O comportamento da concentração nas regiões de estudo, quando simulado, levando em consideração todo o estudo realizado, desde levantamento topográfico, perfis de velocidade e coletas de amostras, se mostra eficiente quando comparado aos dados reais.

Acredita-se que todo o monitoramento previamente realizado antes das simulações, agregou-se positivamente, fornecendo informações importantes para a percepção do fluxo da área de estudo e, principalmente, para a entendimento das interações de fluxo entre os compartimentos e regiões monitoradas.

5 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

Os coeficientes de dispersão longitudinal usados para ambas as análises (PCA e SOM), estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes de Dispersão

EQUAÇÕES	COEFICIENTE DE DISPERSÃO LONGITUDINAL (M/M)
3	0,0697
4	0,1112
5	0,1091
6	0,2433
7	6,6426
8	0,3757
9	189,1630
10	0,0517
11	0,5131
12	14552,7020
14	7,6872
15	0,0859
16	0,0225
17	0,4578
18	4,2790

As variáveis profundidade média (m), velocidade de atrito (m/s), declividade (m/m), largura média (m), vazão (m³/s) e velocidade (m/s) são, respectivamente: 0,2345; 0,08310; 0,0030; 4,0000; 0,0230; 0,0854.

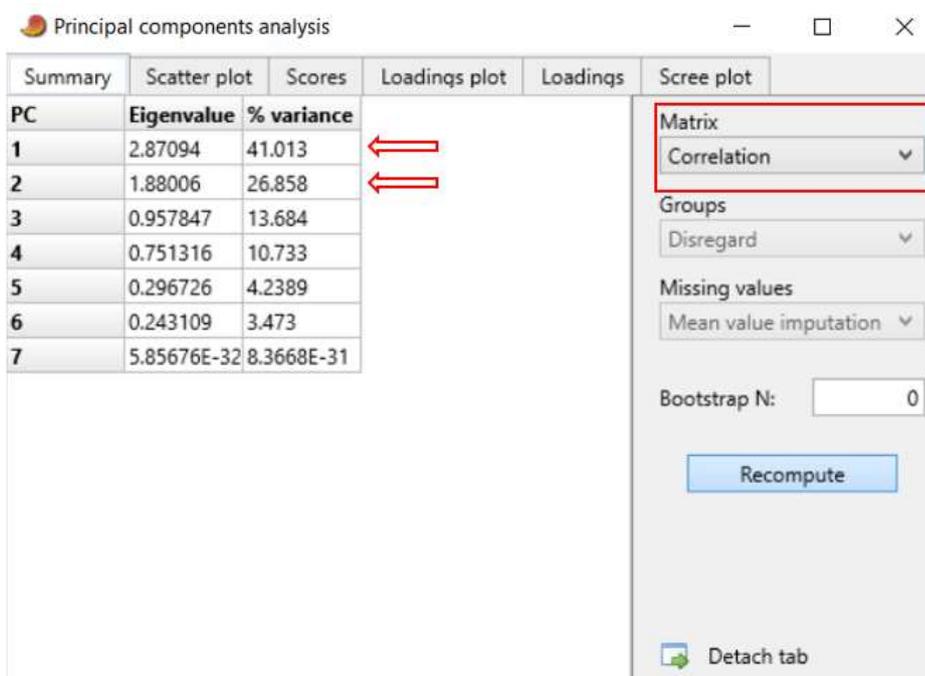
5.1 Análise de PCA

Utilizando as variáveis descritas anteriormente foi possível realizar a análise através do *software Past*. As equações que não utilizam as variáveis para o cálculo dos coeficientes, adotou-se o valor de zero (0).

Ao observar os dados de saída (Figura 40), é possível observar a porcentagem de cada componente e, também, que a análise foi realizada em cima de uma matriz de correlação, já que as variáveis analisadas não são da mesma unidade.

Os PCs iniciais representam um maior peso em relação aos outros, porém é necessário avaliar os autovalores e entender qual variável representa as principais componentes.

Figura 40 - Análise de autovalores



Os componentes PC1 e PC2 representam mais de 65% da análise e a quantidade de componentes gerados pela análise corresponde igualmente à quantidade de variáveis analisadas (nesse estudo um total de 7). A ordem dos componentes principais (PC) apresentados no resultado da análise não corresponde à ordem de entrada dos dados, essa ordem é analisada conforme a análise de autovalores, como mostrado na Figura 41.

Figura 41 - Porcentagem de Variância, retirados do software Past.

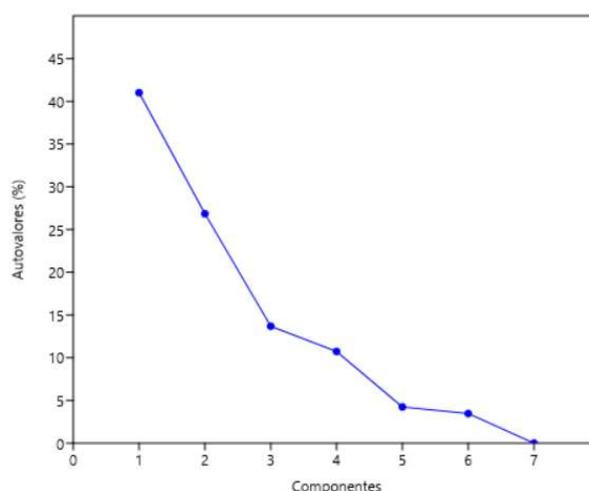
	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	PC 7
Coefficiente	0.14256	0.094525	0.98105	0.033465	-0.084103	-0.0092275	9.4909E-18
H (m)	0.48641	-0.34102	-0.040893	0.35672	0.095713	0.095042	-0.70711
u (m/s)	0.48641	-0.34102	-0.040893	0.35672	0.095713	0.095042	0.70711
S (m/m)	-0.36408	0.19005	-0.02103	0.82336	-0.29278	-0.2593	-3.8305E-17
B (m)	0.13265	0.64758	-0.065493	0.19427	0.18961	0.69646	-6.4757E-17
Q (m³/s)	-0.46887	-0.26149	0.15752	0.1694	0.80737	0.080195	7.8401E-17
U (m/s)	0.36947	0.48437	-0.068187	0.0044361	0.44843	-0.65048	3.4361E-18

Ao analisar a Figura 41, é possível extrair as variáveis de cada componentes, observando as componentes de maior autovalor, ou seja, no caso do PC1 os maiores autovalores calculados foram das variáveis altura (H) e velocidade de atrito (u), isso significa que a primeira principal componente é representada por ambas variáveis, já que representam os maiores autovalores para o PC em análise.

No caso do PC2, a variável representativa é a base (B), e para o PC3 é o Coeficiente.

Na Figura 42, consegue-se visualizar o gráfico de autovalores. Nele é possível perceber uma linearidade entre os componentes 1 ao 3, o que significa que esses componentes explicam a variação dos dados analisados (em termos de porcentagem) e juntos explicam mais de 80% da variação.

Figura 42 - Gráfico de autovalores



A Tabela 10 traz um resumo dos autovalores e as variáveis representativas.

Tabela 10 - Resumo da Variância

PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
H; U	B	Coeficiente	S	Q	B	u
41%	26,85%	13,7%	10,73%	4,2%	3,4%	>0%

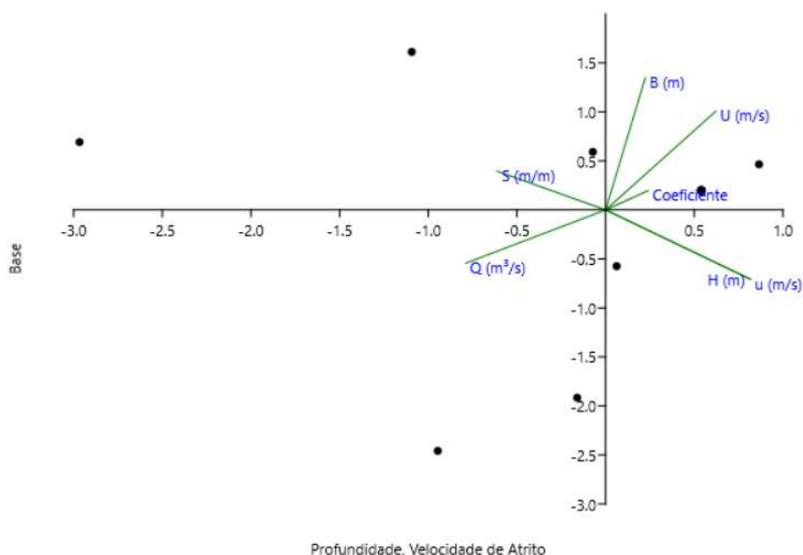
Observa-se que o PC1 é o componente de maior peso na análise, desta forma, o mesmo foi fixado no eixo x dos gráficos de autovalores.

A Figura 43 traz o gráfico de autovalores utilizando os componentes 1 (eixo x) e 2 (eixo y).

E para interpretá-lo basta analisar em qual quadrante cada variável está, isto é, ao analisar a base, a variável declividade possui valores mais altos de correlação.

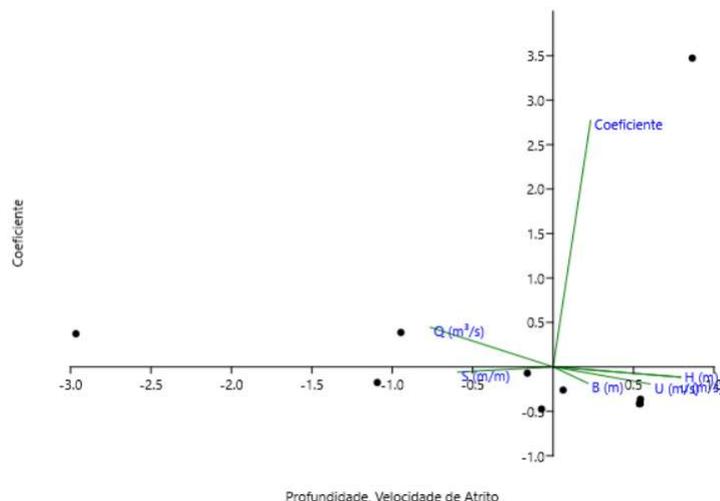
Outra análise importante é o ângulo formado entre os vetores; como o vetor estudado é o coeficiente, nota-se a o ângulo entre coeficiente e velocidade é quase zero, tornando a correlação entre ambos positiva.

Figura 43 - gráfico PC1 x PC2



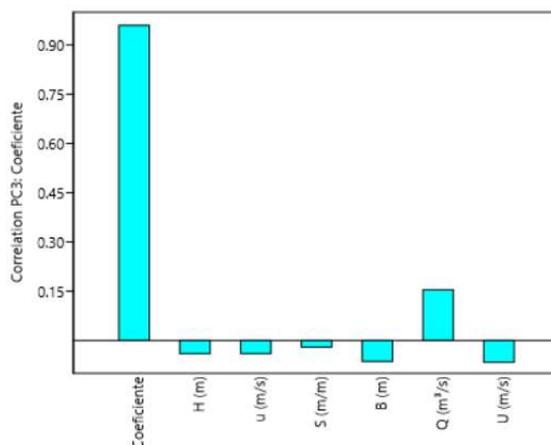
Como a intenção é analisar a correlação entre as variáveis e o coeficiente de dispersão, fez-se o gráfico de autovalores (Figura 44) com os componentes 1 (eixo x) e 3 (eixo y) em análise.

Figura 44 - gráfico PC1 x PC3



E desta maneira, foi possível entender a correlação que a variável coeficiente tem com as demais. Nota-se que a Vazão tem peso positivo no componente 3 (coeficiente). Isso se comprova quando, ao analisar o gráfico de correlação (Figura 45) do componente 3, a variável com correlação positiva é apenas a vazão e o próprio coeficiente.

Figura 45 - Gráfico de correlação



A Figura 45 foi fundamental para a interpretação da análise, porque a partir dela, fez-se o gráfico de correlação para todos os componentes com o intuito de enxergar a correlação contrária, ou seja, analisar individualmente cada variável e obter quais delas têm correlação positiva com o coeficiente, como mostra as Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Gráficos de correlação dos PCs

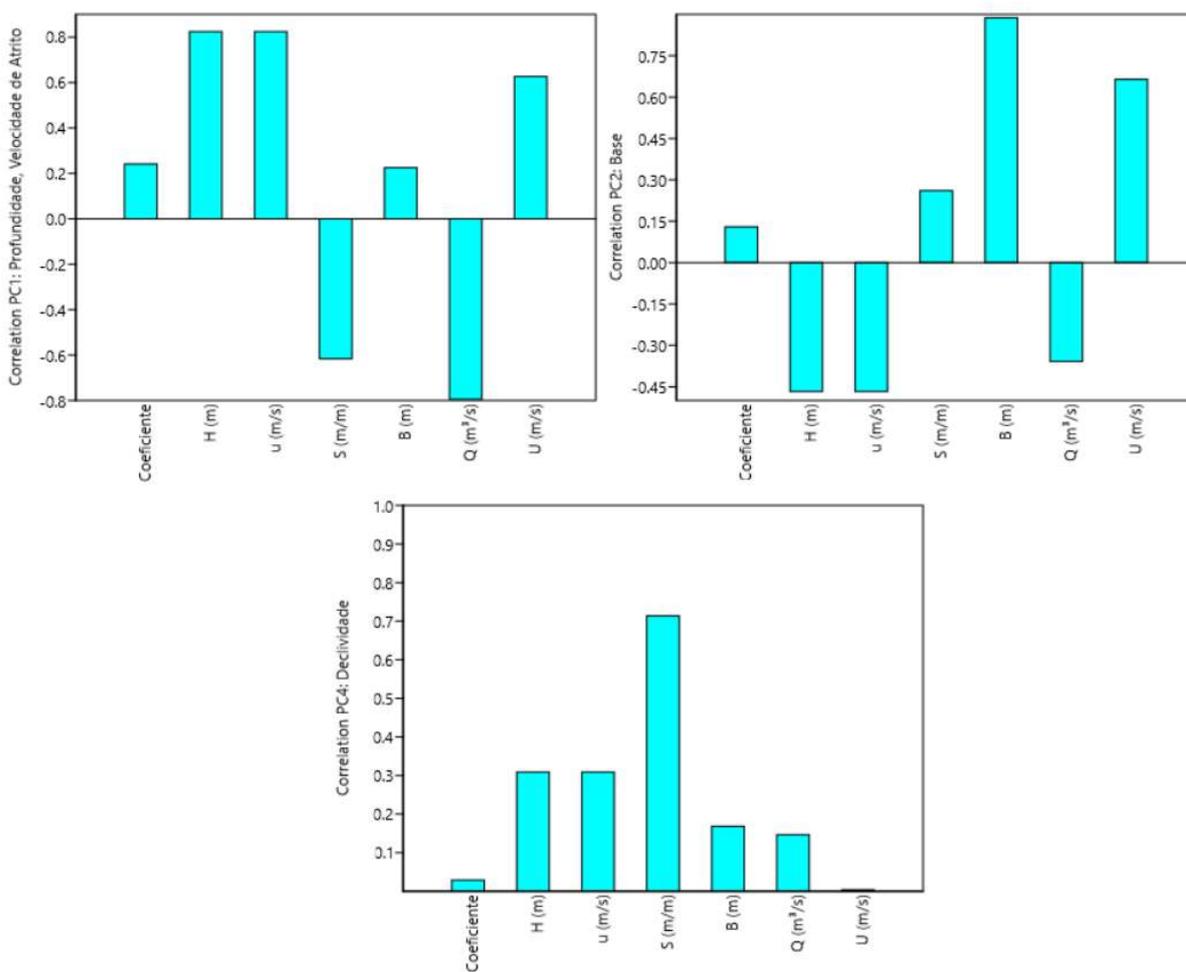
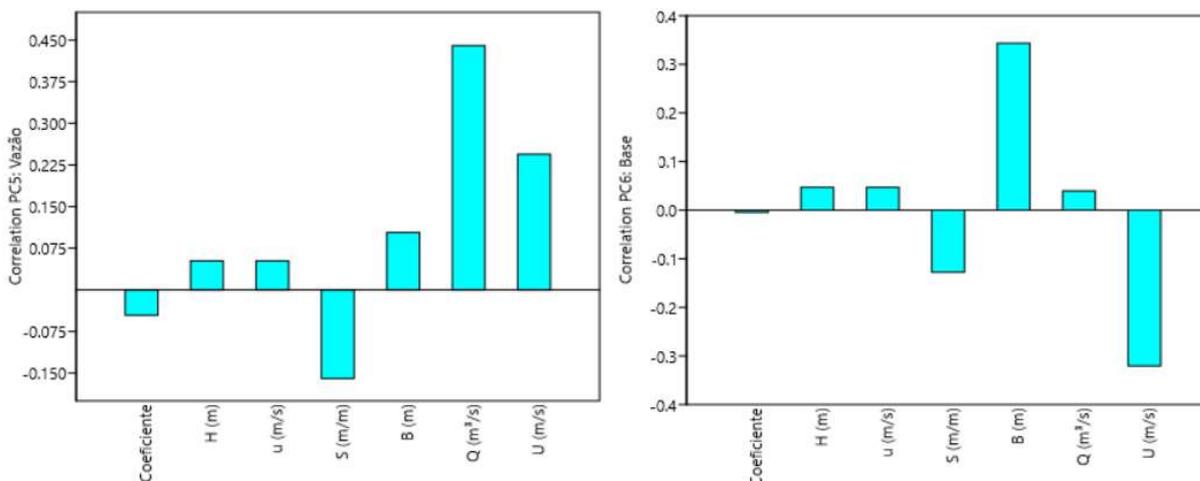


Figura 47 - Gráficos de correlação dos PCs



Analisando a Figura 46, nota-se que os componentes PC1, PC2 e PC4, possuem correlação positiva com o coeficiente. E com os componentes 5 e 6, possuem uma correlação negativa.

Todavia, o coeficiente teve uma correlação positiva com a vazão e isso se dá porque o coeficiente depende da vazão, porém a vazão não depende do coeficiente, por isso a correlação contrária, mas, mesmo assim, é possível confirmar a inter-relação com ambas variáveis.

A correlação negativa com a Base no componente 6 e positiva com a Base no componente 2, dá-se que, no componente 6, a Base possui um autovalor de aproximadamente 4%, um autovalor relativamente pequeno, já que o banco de dados utilizando conta com uma matriz de 7x15.

Considerando estas observações, finda-se que para a área de estudo em questão e com o banco de dados analisado pela técnica de PCA, o coeficiente de dispersão longitudinal tem correlação positiva com a Vazão, variável essa que é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas.

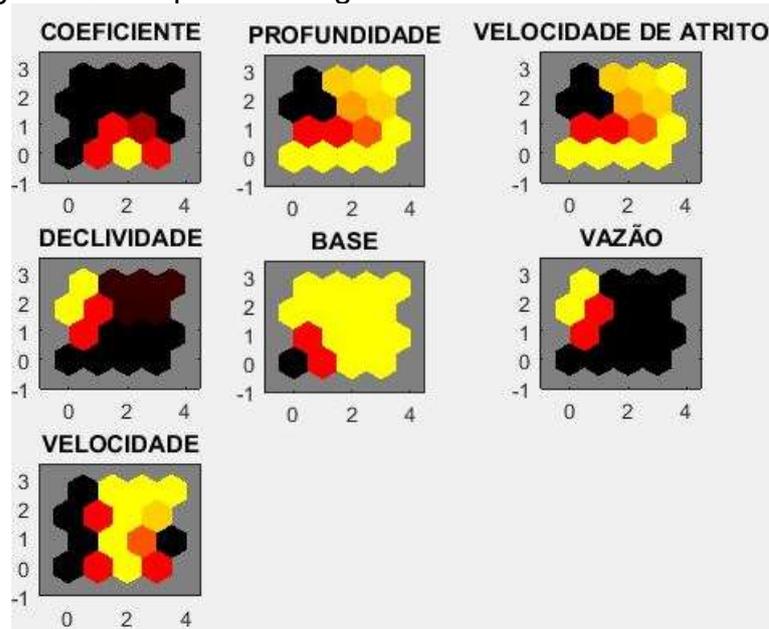
5.2 Análise de SOM

Utilizando o mesmo banco de dados do PCA, e definindo as quatro variáveis do código (topologia, dimensão, passos e vizinhos) foi possível obter os mapas auto organizáveis para o estudo em questão.

As variáveis do código permaneceram as mesmas pré-definidas na metodologia, com ressalva de que os valores de vizinho e passos alterados no código não alteraram os mapas finais, prevalecendo os definidos anteriormente.

Para interpretá-los (Figura 48) deve-se comparar as topologias entre os mapas, ou melhor dizendo, os padrões entre eles. Nos mapas que apresentarem uma topologia parecida existe uma correlação positiva entre as variáveis, da mesma forma em que quando a topologia foi inversa a correlação será negativa.

Figura 48 - Mapas auto organizáveis: Malha de 4 dimensões



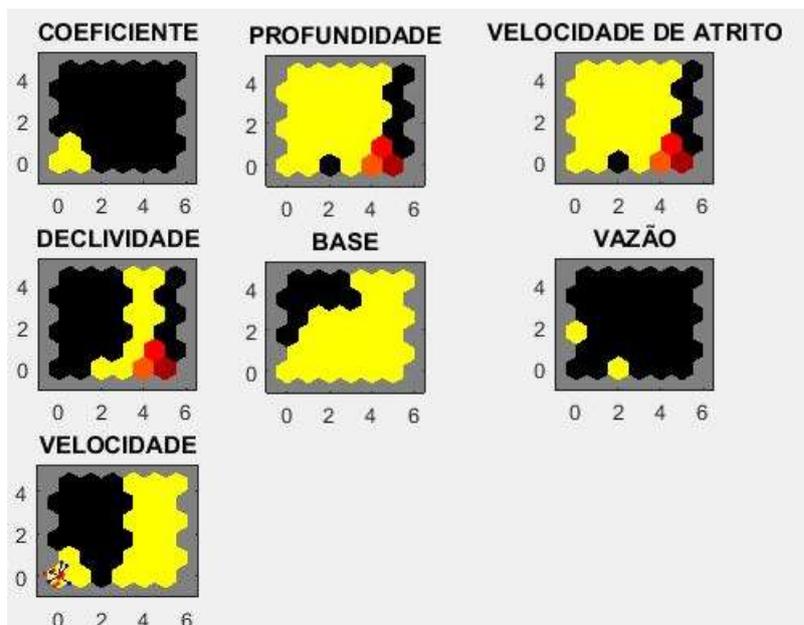
Como o intuito é observar a correlação das variáveis (profundidade, velocidade de atrito, declividade, base, vazão e velocidade) utilizadas nas equações de cálculo do coeficiente, com o coeficiente de dispersão, toma-se como referência de padrão o mapa do coeficiente. Sendo assim, é possível enxergar que na malha 4x4

o mapa da vazão indica uma possível correlação positiva com o mapa do coeficiente. O mesmo acontece com o mapa da declividade.

Já os demais (profundidade, velocidade de atrito, base e velocidade) não possuem relação alguma de padrão positivo com o coeficiente, porém, podemos analisar a relação entre elas, ou seja, se observar esses mapas, todos possuem o mesmo padrão, ressaltando que as variáveis profundidade e velocidade de atrito possuem exatamente o mesmo padrão, da mesma forma que as variáveis base e velocidade.

Para embasar melhor a interpretação dos mapas, optou-se por aumentar a malha, adotando-a 6x6, como mostra Figura 49.

Figura 49 - Mapas auto organizáveis: Malha de 6 dimensões



Na Figura 49 é possível encontrar padrão mais alto entre as variáveis coeficiente e vazão e um pouco mais baixa com a declividade. As variáveis profundidade e velocidade de atrito continuam exatamente iguais.

Ao analisar os mapas com dimensões 4x4 e 6x6, a interpretação dos mapas manteve-se em um padrão, com poucas ressalvas, entretanto, como o banco de dados analisado é pequeno, qualquer variação nos padrões do mapa interfere

significativamente na correlação. Devido a isso optou-se por desenvolver mapas com malhas maiores (8x8 e 10x10) a fim de ampliar a interpretação realizada até o momento.

Na malha de 8x8 (Figura 50) e 10x10 (Figura 51), foi possível corroborar que os padrões entre coeficiente, vazão e declividade se mantiveram, isto é, há uma correlação positiva entre essas variáveis.

Figura 50 - Mapas auto organizáveis: Malha de 8 dimensões

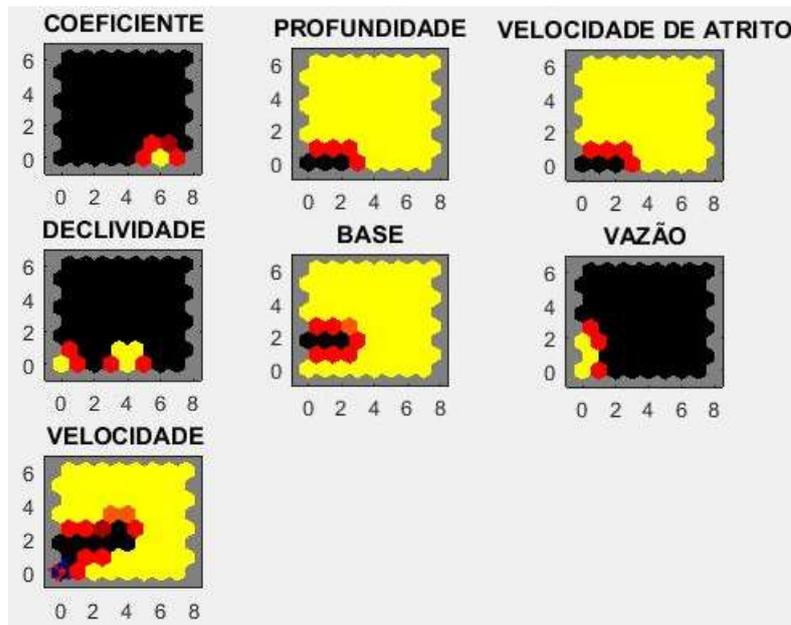
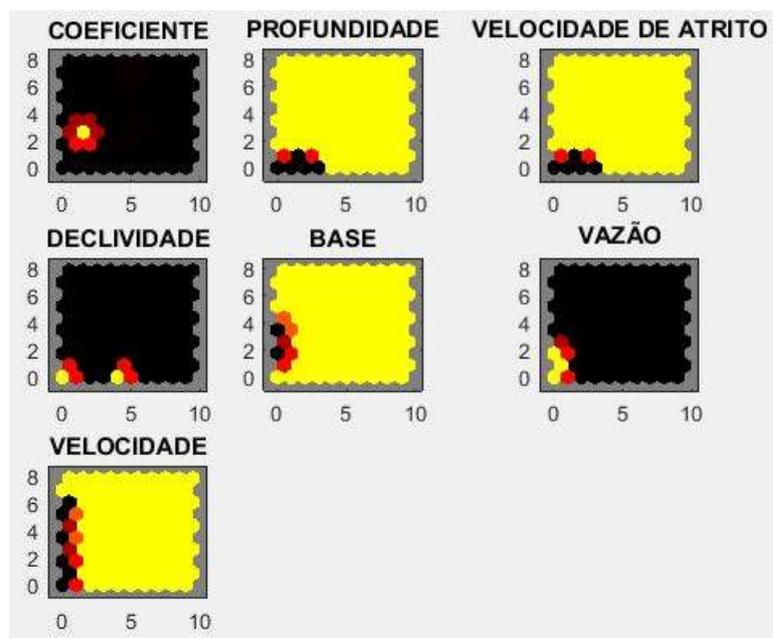


Figura 51 - Mapas auto organizáveis: Malha de 10 dimensões



O mesmo ocorre nas variáveis faltantes: profundidade e velocidade de atrito, que permaneceram idênticas independente da malha escolhida, comprovando uma relação positiva entre elas. Da mesma forma entre as variáveis base e velocidade.

Sobre a variação das malhas, conclui-se que por se tratar de um banco de dados pequeno (15x7), e para agregar positivamente na interpretação dos mapas, além da malha inicial 4x4 optou-se pela elaboração de mais 3 malhas (6x6; 8x8 e 10x10), para certificar-se que o padrão estabelecido na malha 4x4 se mantivesse.

Com base nisso, conclui-se que a melhor opção seria a malha 10x10, pois nota-se que as malhas anteriores estavam se ajustando ao modelo, já as de 8 e 10 dimensões tiveram padrões muito parecidos.

Por ora, ao analisar as correlações positivas entre as variáveis e o coeficiente de dispersão, conclui-se que a vazão e a declividade são as variáveis com esse indício.

Finalizadas as análises de correlação, é possível constatar que em ambas as análises a vazão se mostrou positivamente correlacionada com o coeficiente de

dispersão, variável essa que é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas, que são: McQuivey & Keefer (1974) e Liu (1977).

Já na técnica do SOM, a declividade, também se mostrou satisfatória na correlação com o coeficiente e essa variável também é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas, que são: McQuivey & Keefer (1974) e Devens et al. (2010).

Em apenas uma equação (McQuivey & Keefer (1974)) a vazão e a declividade são usadas em conjunto para cálculo do coeficiente de dispersão.

Com isso, os valores do coeficiente de dispersão longitudinal para as três equações apontadas foram: 0,1111; 0,2433; e 0,4578, para McQuivey & Keefer (1974), Liu (1977) e Devens et al. (2010), respectivamente.

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a pesquisa, optou-se por partir de um problema real, ou seja, um lançamento de um poluente, aqui apresentado como traçador, pela margem do rio (conforme exigido pelos órgãos fiscalizadores), e, assim, poder compreender como esse lançamento e o corpo hídrico se comportam no quesito de dispersão. Foi possível aprimorar a técnica utilizada por Lopes (2016), adaptando-a a realidade atual.

O comportamento da dispersão nas três alturas monitoradas se comporta de forma parcialmente parecida, como visto na formação da pluma, significando que a velocidade e a geometria influenciam na dispersão e comportamento do curso d'água.

Porém, a visualização do comportamento da concentração em três níveis assegura que a zona de mistura ocorreu. Nesse estudo, em específico, não foi possível ver a zona de equilíbrio completa, devido à extensão do rio estudado, mas foi possível visualizar o início dessa zona, isto é, a extensão estudada já certifica o comportamento do corpo receptor.

O corpo hídrico escolhido é importante para o município, uma vez que o mesmo é usado para abastecimento público, ressalta-se que compreender, analisar, simular o comportamento do rio é valioso, já que esse curso d'água têm seu contorno caracterizado por atividades agrícolas e pode ocorrer despejos não fiscalizados. Além disso, a biota vai se modificando, com isso é preciso preservar a vida aquática em todas as instâncias.

A grande diversidade das características hidrodinâmicas e geométricas presentes nos cursos d'águas naturais brasileiras dificultam padronizar um comportamento em três níveis de monitoramento, por isso, nesse estudo é fundamental todo o levantamento topográfico e caracterização hidráulica, pois essas informações apontam para como é o fluxo real do rio.

As análises de correlação realizadas, PCA e SOM apontaram que a vazão é a variável de maior peso quando se trata do coeficiente de dispersão longitudinal, já que essa correlação foi positiva em ambas as técnicas utilizadas. Em ambas as análises a vazão se mostrou positivamente correlacionada com o coeficiente de

dispersão, variável essa que é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas, que são: McQuivey & Keefer (1974) e Liu (1977).

Já na técnica do SOM, a declividade, também se mostrou satisfatória na correlação com o coeficiente e essa variável também é utilizada em apenas duas das quinze equações estudadas, que são: McQuivey & Keefer (1974) e Devens et al. (2010). Em apenas uma equação (McQuivey & Keefer (1974)) a vazão e a declividade são usadas em conjunto para cálculo do coeficiente de dispersão. Com isso, os valores do coeficiente de dispersão longitudinal para as três equações apontadas foram: 0,1111; 0,2433; e 0,4578, para McQuivey & Keefer (1974), Liu (1977) e Devens et al. (2010), respectivamente.

O monitoramento em três níveis possibilitou um conhecimento maior do comportamento da dispersão, podendo acompanhar o fluxo real do traçador lançado. O estudo permitiu concluir, também, que o monitoramento da pluma é essencial aos gestores hídricos, à medida que garante um entendimento do ingresso de poluentes.

Acredita-se que os modelos matemáticos propostos representam o comportamento, sabendo que muitos parâmetros externos influenciam, principalmente, valores como o decaimento e o tempo simulado.

Na simulação realizada, o fluxo adotado entre os compartimentos foi o mais próximo do real (considerando as concentrações do contaminante coletadas nos pontos de monitoramento e nas filmagens realizadas), para que assim o resultado mostrasse o comportamento da concentração muito mais perto da realidade.

O comportamento da concentração simulada comparada com o comportamento da concentração coletada se mostrou em sintonia, uma vez que ambos os comportamentos mantiveram o mesmo padrão. Vale ressaltar que para essa sintonia existir, o estudo detalhado do decaimento entre os compartimentos foi de grande importância, uma vez que o mesmo foi mensurado usando dados reais e coletados de forma simultânea.

Assim acredita-se que o monitoramento de contaminantes pode auxiliar no desenvolvimento da modelagem matemática, alimentando sistemas com parâmetros reais, uma vez que tal técnica que vem sendo muito utilizada na área de qualidade de água, no planejamento das demandas e ofertas das águas superficiais, de forma a

subsidiar estudos, entendimentos e ações estratégicas de recuperação e preservação dos meios.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. F. B. Modelagens Matemáticas para Simulações Computacionais de Impacto Ambiental no Rio Balsas. **Dissertação - Instituto de Matemática - UNICAMP**, Campinas, 2009.
- AMORIM, D. G. et al. Enquadramento e avaliação do índice de qualidade da água dos igarapés Rabo de Porco e Precuá, localizados na área da Refinaria Premium I, município de Bacabeira (MA). **Eng Sanit Ambient**, v. 22, n. 2, p. 251-259, mar/abr 2017.
- ANA. **Atlas de Esgoto: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2017.
- ARBES, R.; JORGE, K. D. Descentralização da gestão da água: porque os comitês de bacia estão sendo criados? **Ambiente & Sociedade**, v. 8, p. 0, jul/dez 2005.
- BERTOLLETI, E. Controle Ecotoxicológico de Efluentes Líquidos no Estado de São Paulo, 2013.
- BRASIL, CONAMA Nº357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Diário Oficial da União: Republica Federativa do Brasil, Poder Executivo. Brasília. 2005.
- BRENTAN, B. M. Sistemas de abastecimento de Água inteligentes: previsão de demanda e controle ótimo em tempo real. **Tese - Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2017.
- COIMBRA, A. L. S. C.; TELLES, W. R. Modelagem e Solução de um Problema de Transporte de Contaminantes Utilizando o Método dos Volumes Finitos. **SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA**, Rio de Janeiro, 2019.
- CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; PINHEIRO, L. A. R. Modelagem e simulação do escoamento e dispersão sazonais de agentes passivos no rio Araguari. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 34-51, 2013.
- CUNHA, C. D. L. N.; FERREIRA, A. P. Análise crítica por comparação entre modelos de qualidade de água aplicados em rios poluídos: contribuições à saúde, água e saneamento. **Eng Sanit Ambient**, v. 24, n. 3, p. 473-480, maio/junho 2019.
- DEVENS, J. A. Quantificação do Coeficiente de Dispersão Longitudinal em Pequenos Cursos D'água Naturais com Uso de Traçador Ambientalmente Neutro. **Dissertação - Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2006.

- DEVENS, J. A.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q. Modelos Empíricos e Semi-Empíricos para a Obtenção do Coeficiente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 1, p. 75-88, Jan/Mar 2010.
- DONG, Y.; SCHOLZ, M.; HARRINGTON, R. Statistical Modeling of Contaminants Removal in Mature Integrated Constructed Wetland Sediments. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**, v. 138, p. 1009-1017, 2012.
- EDELSTEIN, K. L. Mathematical models in biology, México, n. 1, p. 03-29, 1988.
- FAN, C.; KO, C.-H.; WANG, W.-S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. **Journal of environmental management**, v. 90, p. 1824-1832, 2009.
- FAN, F. M.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, . Modelagem baseada em agentes para a simulação da dispersão de poluentes em cursos d'água. **Eng Sanit Ambient** |, v. 21, n. 4, p. 739-746, out/dez 2016.
- GARCIA, ET AL, R. L. PLANEJAMENTO DE REDES DE ESGOTO E ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL: UMA FERRAMENTA DE GESTÃO. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 1, p. 5-16, 2014.
- HARARI, J. et al. Modelagem numérica da hidrodinâmica e da dispersão de esgoto na Baía de Santos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 205-214, 2013.
- HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. D. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, v. 1, n. 5, p. 83:90, Junho 2016.
- JESUS, J. A. O. Utilização de modelagem matemática 3D na gestão da qualidade da água em mananciais - aplicação no Reservatório Billings, São Paulo, 2006.
- KALTEH, A. M.; HJORTH, P.; BERNDTSSON, R. Review of the self-organizing map (SOM) approach in water resources: Analysis, modelling and application. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 835-845, 2008.
- KOHONEN, T. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. **Biological Cybernetics**, v. 43, p. 59-69, 1982.
- KOHONEN, V. **Towards experiential foreign language education, Experiential learning in**. New York: Person Education, 2001.
- KROEZE, C. et al. Global modelling of surface water quality: a multi-pollutant approach. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 23, p. 35-45, 2016.
- LARENTIS, D. G. Modelagem matemática da qualidade da água em grandes bacias: sistema Taquari-Antas-Rs, Porto Alegre, 2004.

LIMEIRA (SP). **Relatório Anual de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos**. Prefeitura de Limeira. Limeira, p. 47. 2016/2017.

LINS, R. C. et al. Integração de um modelo hidrológico a um SIG para avaliação da qualidade da água da Bacia do Rio Doce. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 171-181, 2012.

LOPES, M. S. Montagem de um canal retangular hidráulico para estudo de dispersão de um traçador conservativo. **Dissertação - Universidade Estadual de Campinas**, Limeira, 2016.

MACHADO, B. Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios, 2006.

MACHADO, B. R. et al. Simulação de um modelo bidimensional transiente aplicado à dispersão de poluentes em um corpo hídrico. **RIPE**, p. 1-12, 2019.

MACHADO, M. B. et al. Proposição de uma nova metodologia para o estudo da dispersão de efluentes em rios. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 23, p. 18-21, 2007.

MATTOS, J. B.; SILVA, K. B. Aplicação de mapas auto-organizáveis e SIG: análise espacial da hidroquímica dos aquíferos em uma média cidade brasileira. **Águas Subterrâneas**, v. 33, p. 210-220, 2019.

MONTOVANI, C. P. "Presença de fósforo e modelagem de seu comportamento evolutivo no reservatório do Tatu". **Dissertação - Unicamp**, Limeira, 2012.

OLIVEIRA, C. M. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DISPERSÃO DE UM CANAL PARA VALIDAÇÃO DE UM SOFTWARE DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD). **Dissertação - Universidade Estadual de Campinas**, Limeira, 2017.

OLIVEIRA, V. V. Quantificação e avaliação do coeficiente de dispersão longitudinal em curso d'água. **Dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos**, São Carlos, 2013.

PALAU, C. V.; ARREGUI, F.; FERRER, A. Using multivariate principal component analysis of injected water flows to detect anomalous behaviors in a water supply system-a case study. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 4, p. 169-182, 2004.

PEIXOTO, F. D. S.; STUART, T. M. D. C.; CAMPOS, J. N. B. Gestão das águas urbanas: questões e integração entre legislações pertinentes. **REGA**, Porto Alegre, v. 13, p. 160-174, jul/dez 2016.

PEREIRA, C. E. et al. Dispersion of pollutants in watercourses intercepted by highway BR-050, in the Triângulo Mineiro region, Minas Gerais, Brazil. **Acta Scientiarum**, v. 38, n. 2, p. 153-161, 2016.

PEREIRA, R. D. S. POLUIÇÃO HIDRICA: CAUSAS E CONSEQUENCIAS. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos**, v. 1, p. 20-36, 2004.

RIBEIRO, C. B. M et al. Comparação de metodologias para determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios: estudo desenvolvido no Rio Pomba (MG). **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Associação Brasileira de Recursos Hídricos-ABRH, São Paulo**, 2007.

ROCHA, C. H. B.; PEREIRA, A. M. Análise multivariada para seleção de parâmetros de monitoramento em manancial de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, p. 176-187, jan-mar 2015.

ROMIEIRO, N. M. L. Simulação numérica de modelos de qualidade de água usando o método de elementos finitos estabilizados, Rio de Janeiro, 2003.

SABIN, Janusa Goelzer; FERRÃO, Marco Flôres; FURTADO, João Carlos. Análise multivariada aplicada na identificação de fármacos antidepressivos. Parte II: Análise por componentes principais (PCA) e o método de classificação SIMCA. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 40, n. 3, p. 387-396, 2004.

SALES, R. J. M.; ARAÚJO, J. A. F.; CHAGAS, P. F. ANALISE DE RISCO EM RIOS NATURAIS SUJEITOS A LANÇAMENTOS DIFUSOS DE POLUENTES. **Forum Ambiental da Alta Paulista**, v. 10, n. 2, 2014.

SANTOS, S. H. ; VIDAL, T. F.; LOPES, A. A. S. Desenvolvimento de um modelo de dispersão advectiva, de natureza fuzzy, para estudar comportamento de campos de concentração em rios naturais. **Forum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, p. 57-68, 2016.

SENNA, L. D. D.; MAIA, A. G.; MEDEIROS, J. D. F. D. The use of principal component analysis for the construction of the. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 19, p. 1-14, Fevereiro 2019.

SILVA, C. D. O. F.; GOVEIA, D. Avaliação da qualidade ambiental de corpos hídricos urbanos utilizando análise multivariada. **INTERAÇÕES**, Campo Grande, v. 20, p. 947-958, jul/set 2019.

SILVA, C. M. D. R. D.; JUNIOR, N. C.; PEREIRA, J. V. O desastre do Rio Doce: estudo do escoamento da lama por modelos de transporte de massa. **Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied**, v. 6, 2018.

SILVA, M. G. et al. Análise da influência de parâmetros ambientais no fluxo de metano em áreas alagáveis e lagoas permanentes na região do Rio Abobral, no Pantanal,

Brasil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, p. 327-338, abr/jun 2016.

SILVA, M. O. M. Determinação de equação para o coeficiente de transferência de massa e o uso da fluidodinâmica computacional (CFD) para canal hidráulico. **Dissertação - Universidade Estadual de Campinas**, Limeira, 2017.

SILVA, P. V. R. M.; PECLY, J. O. G.; AZEVEDO, J. P. S. Uso de Traçadores Fluorescentes para Determinar Características de Transporte e Dispersão no Rio Piabanha/RJ na Modelagem Quali-quantitativa pelo HEC-RAS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, 2017.

SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; ZUCCO, E. Determinação do coeficiente de dispersão longitudinal em rios. **REGA**, v. 10, p. 27-36, 05 dez. 2013.

SODRÉ, U. Modelos Matemáticos, Londrina, 2007.

SOUZA, J. B. et al. Componentes principais e modelagem linear generalizada na associação entre atendimento hospitalar e poluição do ar. **Rev Saúde Pública**, v. 48, p. 451-458, 2014.

SPERANDIO, Mauricio; COELHO, Jorge; QUEIROZ, Hermes L. Identificação de agrupamentos de consumidores de energia elétrica através de Mapas Auto-Organizáveis. **V Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Aracajú**, 2003.

TSAI, W.-P. et al. A data-mining framework for exploring the multi-relation between fish species and water quality through self-organizing map. **Science of the Total Environment**, v. 579, p. 474-483, 2017.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; PARESCHI, D. C. E. A. A bacia hidrográfica do Tiete-Jacaré: estudo de caso em pesquisa e gerenciamento. **Estudos Avançados**, v. 2, p. 159-172, 2008.

VENTURINO, E.; TIWARI, P. K.; MISRA, A. K. Modeling the depletion of dissolved oxygen in a water body located near a city. **Mathematical Methods in the Applied Sciences**, v. 40, p. 1081-1094, 2016.

VIDAL, T. F.; CHAGAS, P. F.; SOUZA, R. O. EQUAÇÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES EM RIOS, PARA DIFERENTES FONTES DE LANÇAMENTOS, CONSIDERANDO OS DIVERSOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO CORPO HÍDRICO. **Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 6, 2015.

ZENG, Y.; HUAI, W. Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 8, p. 2-8, Março 2014.

ZHANG, T. et al. Analysis of nutrient transport and ecological response in Honghu Lake, China by using a mathematical model. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 418-428, 2017.

ANÁLISE DE FORMAÇÃO E COMPORTAMENTO DE PLUMAS DE CONTAMINANTES EM UM CURSO D'ÁGUA NATURAL

MICHELE DOS SANTOS LOPES CERQUEIRA

2022