

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**GABRIEL DE ESPÍNDULA FAGUNDES**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS DE DRENAGENS ÁCIDAS EM  
CORPOS HÍDRICOS, A PARTIR DE UM SIMULADOR DE QUALIDADE DA ÁGUA  
ACOPLADO A SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: ESTUDO DE CASO  
NAS BACIAS DOS RIOS SANGÃO E MÃE LUZIA.**

**CRICIÚMA**

**2019**

**GABRIEL DE ESPÍNDULA FAGUNDES**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS DE DRENAGENS ÁCIDAS EM  
CORPOS HÍDRICOS, A PARTIR DE UM SIMULADOR DE QUALIDADE DA ÁGUA  
ACOPLADO A SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: ESTUDO DE CASO  
NAS BACIAS DOS RIOS SANGÃO E MÃE LUZIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental e Sanitarista no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientador(a): Prof. Msc. Gustavo José Deibler Zambrano.

**CRICIÚMA**

**2019**

**GABRIEL DE ESPÍNDULA FAGUNDES**

**ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE SUBSTÂNCIAS DE DRENAGENS ÁCIDAS EM  
CORPOS HÍDRICOS, A PARTIR DE UM SIMULADOR DE QUALIDADE DA ÁGUA  
ACOPLADO A SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: ESTUDO DE CASO  
NAS BACIAS DOS RIOS SANGÃO E MÃE LUZIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental e Sanitarista, no Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em recursos hídricos e saneamento ambiental.

Criciúma, 29 de novembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Gustavo José Deibler Zambrano - Mestre – (UNESC) - Orientador

Prof.<sup>a</sup> Cristina Moreira Lalau - Mestra – (UNESC)

Prof.<sup>a</sup> Nadja Zim Alexandre - Mestra - (IMA-SC)

Dedico este trabalho a todos que, de alguma maneira, estiveram envolvidos na sua realização e que, perante as dificuldades que surgiram, esforçaram-se para que os resultados almejados pudessem ser atingidos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a minha namorada e amiga Stéfani, pela paciência, companheirismo e compreensão, sobretudo nos últimos meses.

Agradeço imensamente aos meus pais e a minha irmã por sempre terem me incentivado a seguir meus sonhos.

Ao meu orientador Gustavo Zambrano, pelos conselhos e por ter investido e auxiliado nesse projeto, além de todo conhecimento e experiências partilhadas durante parte de minha graduação.

Aos meus colegas e amigos, com quem convivi durante os últimos anos, pelo companheirismo e aprendizado compartilhado.

Aos servidores da ANM, com quem tive a oportunidade de trabalhar, em especial ao Oldair e ao Fábio, pessoas de grande saber, que partilharam seus diversos conhecimentos.

Por fim, agradeço a todos que indiretamente me auxiliaram ou participaram da realização deste projeto.

“Na vida, encontrar uma voz é falar e viver a verdade. Cada um de vocês é original. Cada um de vocês tem uma voz inconfundível. Quando você encontrar a sua, sua história será contada. Você vai ser ouvido.”

John Grisham

## RESUMO

Diante do cenário de desenvolvimento atual, a adoção de métodos que permitam anteceder ou avaliar os impactos gerados por atividades potencialmente poluidoras, ou mesmo, de eventos acidentais, se faz essencial para que se consiga ter um adequado controle da degradação ambiental e, dos estágios de recuperação de áreas afetadas. Deste modo, este trabalho objetivou simular, por meio do *software* SIAQUA-IPH, o comportamento dos lançamentos de DAM provenientes de bocas de mina abandonadas dentro das bacias dos rios Sangão e Mãe Luzia, sendo calculadas a concentração de ferro dissolvido e manganês total ao longo de toda extensão destes recursos hídricos e, além disso, analisar a viabilidade de aplicação em estudos profissionais do modelo desenvolvido, sendo analisados os valores simulados com a situação encontrada em campo dos referidos ambientes. Como metodologia, adotou-se a discretização das bacias hidrográficas em estudo, por meio do *ArchHydro*, tendo estas as vazões de todos os seus trechos calculadas a partir de um método de regionalização feito através do PrePro-SIAQUA-IPH e baseada nos dados históricos do posto fluviométrico localizado em Forquilha e chamado de 84820000, tendo ainda, sido realizada uma espacialização da localização de todas bocas de mina abandonadas e monitoradas pelo GTA que se encontram dentro da área das bacias de drenagem analisadas. Com isso, foram inseridos lançamentos contínuos com coeficientes de decaimento estipulados a partir da literatura para cada um dos parâmetros analisados e, gerados mapas para as situações de altas, médias e baixas vazões dos rios. Com os testes realizados, pode-se encontrar uma série de mapeamentos com a variação da concentração dos poluentes inseridos no meio ao longo do tempo e do espaço percorrido por eles, demonstrando que, a influência das bocas de mina abandonadas deflagra uma relevante contribuição negativa, especialmente no Rio Sangão. Este resultado acabou não sendo tão intensificado no Rio Mãe Luzia, devido a este receber a drenagem de apenas uma destas bocas de mina. Todavia, com os estudos realizados, pode-se constatar a viabilidade na aplicabilidade do modelo desenvolvido, especialmente na região da AMREC que está sob constantes monitoramentos em decorrência do alto índice de degradação de seus recursos hídricos, porém, foi percebido também que, para que os resultados fiquem fidedignos com a realidade, faz-se necessário que alguns trabalhos de campo sejam realizados para que o modelo utilizado seja melhor calibrado de acordo com as condições do ambiente que se pretende estudar.

**Palavras-chave:** Efluente, ferro, manganês, recursos hídricos, SIG.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Bacia Hidrográfica do Rio Kankakee, acima de Davis, Indiana.....	15
<b>Figura 2</b> - Fontes de poluição pontuais e difusas. ....	17
<b>Figura 3</b> - Exemplificações de diferentes tipos de lançamentos. ....	21
<b>Figura 4</b> - Diluição de efluentes em corpos hídricos superficiais. ....	23
<b>Figura 5</b> - Esquema simplificado do processo de autodepuração. ....	24
<b>Figura 6</b> - Degradação de curso hídrico, afetando fauna e flora locais. ....	25
<b>Figura 7</b> - Conceito de manipulação de dados em SIG. ....	28
<b>Figura 8</b> - Fluxograma metodológico. ....	33
<b>Figura 9</b> – Discretização da bacia hidrográfica: (1) MDE, (2) Direções de fluxo, (3) Rede de drenagem, (4) Mini bacias. ....	36
<b>Figura 10</b> - Localização dos pontos de lançamento de efluente.....	41
<b>Figura 11</b> - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de altas vazões. ....	42
<b>Figura 12</b> - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de médias vazões. ....	43
<b>Figura 13</b> - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de baixas vazões.....	43
<b>Figura 14</b> - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de altas vazões. ....	47
<b>Figura 15</b> - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de médias vazões. ....	48
<b>Figura 16</b> - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de baixas vazões.....	48

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Classificação dos corpos hídricos de acordo com a sua utilização. ....	18
<b>Quadro 2</b> - Classificação de efluentes a partir da fonte geradora.....	20
<b>Quadro 3</b> - Descrição dos principais programas de SIG. ....	30
<b>Quadro 4</b> - Dados da estação fluviométrica utilizada para regionalização de vazões da bacia hidrográfica delimitada.....	37
<b>Quadro 5</b> - Padrões para corpos de água de acordo com sua classe.....	38
<b>Quadro 6</b> - Lançamentos de drenagem ácida na bacia hidrográfica delimitada. ....	39
<b>Quadro 7</b> - Constantes de decaimento cinético utilizadas.....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMREC	Associação dos municípios da Região Carbonífera
CEPCAN	Comissão Executiva do Plano de Carvão Nacional
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTA	Grupo Técnico de Assessoramento
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MDE	Modelo Digital de Elevação
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial hidrogeniônico
SIAQUA	Simulador Analítico de Qualidade da Água
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SR	Sensoriamento Remoto
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VMP	Valor Máximo Permissível

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1 RECURSOS HÍDRICOS.....	13
<b>2.1.1 Ciclo hidrológico</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1.2 Bacias hidrográficas</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.3 Usos e fontes de poluição das águas</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.4 Poluição e parâmetros de qualidade da água</b> .....	<b>17</b>
2.1.4.1 Lançamento de efluentes .....	19
2.1.4.1.1 <i>Tipos de lançamentos de poluentes</i> .....	20
2.1.4.2 Padrões de potabilidade .....	21
<b>2.1.5 Poluentes no meio aquático</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1.6 Recursos hídricos no estado de Santa Catarina</b> .....	<b>24</b>
2.2 GESTÃO AMBIENTAL DE RECURSOS HÍDRICOS .....	26
2.3 GEOPROCESSAMENTO E MÉTODOS DE SIMULAÇÃO .....	27
<b>2.3.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)</b> .....	<b>28</b>
2.3.1.1 Programas de SIG .....	29
<b>2.3.2 Modelos hidrológicos e de qualidade da água integrados ao SIG</b> .....	<b>31</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
3.1 LINHAS GERAIS .....	33
3.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.3 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	34
3.4 PREPARO DOS DADOS GERADOS PELO <i>ARC HYDRO TOOLS</i> .....	36
3.6 SIMULAÇÃO DO LANÇAMENTO DE POLUENTES DENTRO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	38
3.7 DADOS GERADOS.....	41
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	<b>42</b>
6.1 DISPERSÃO DO FERRO DISSOLVIDO NO CORPO HÍDRICO .....	42
6.2 DISPERSÃO DO MANGANÊS TOTAL NO CORPO HÍDRICO.....	46
6.3 COMPORTAMENTO DAS SUBSTÂNCIAS SIMULADAS.....	50
6.4 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES FRENTE À REAL SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA AMREC.....	51
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O modelo de desenvolvimento adotado nos dias atuais, demanda de uma ampla necessidade de recursos naturais, o que faz com que os mais diversos ambientes sejam afetados significativamente, em decorrência de uma exploração que, por vezes, é realizada sem o planejamento necessário.

Neste sentido, a adoção de práticas que permitam avaliar os riscos associados ao meio ambiente, antes do início de qualquer atividade, se faz essencial para que se consiga evitar impactos negativos frente aos recursos naturais, uma vez que, medidas preventivas podem ser utilizadas de modo a fornecer maior segurança nas atividades desenvolvidas.

E, para que se possa avaliar os riscos envolvidos durante a realização de certas atividades frente ao campo ambiental, muito se pode usufruir dos sistemas de informação geográfica, pois estes são ferramentas que geram uma potencialização na análise dos dados e nos resultados obtidos, permitindo o desenvolvimento de modelos espaciais em função de todos os parâmetros relevantes envolvidos (SILVEIRA; CRUZ, 2005), cabendo apenas aos profissionais responsáveis por tais estudos, analisarem as alternativas de *softwares* disponíveis e, testar sua eficácia em casos práticos, afim de acoplá-los em seus estudos convencionais.

Assim, tendo em vista que a água é um dos recursos naturais mais importantes e que, sofre constantemente em decorrência de sua suscetibilidade a degradação, técnicas que permitam prevenir que novos danos sejam causados nos recursos hídricos detêm importância bastante relevante para estudos nos dias atuais, muito em função dela ser imprescindível para o desenvolvimento de diversas atividades, como irrigação e abastecimento público, e ainda, ser primordial no processo produtivo de inúmeros empreendimentos.

Desta forma, o trabalho a ser desenvolvido se baseia na aplicação integrada de simulações que tem a função de permitir que sejam antecedidos possíveis impactos negativos em recursos hídricos, oriundos de falhas de projeto ou de execução de atividades, além de possíveis lançamentos de efluentes irregulares nos mesmos, os quais tem a capacidade de comprometer significativamente a qualidade da água da bacia hidrográfica, além de analisar aquelas situações de degradação que já se apresentam em diversos locais, como drenagens oriundas de

processos existentes ou desativados que, não possuem maneiras de controle e/ou remediação implantadas.

O modelo de simulação sobre o qual se trabalhou, fundamenta-se no manuseio do *software* SIAQUA-IPH, que foi desenvolvido nos últimos anos como objeto de pesquisa de mestrado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, com o intuito de integrar modelos matemáticos com os sistemas de informações geográficas, potencializando a descrição das áreas em estudo e sua respectiva análise.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi simular as alterações provocadas nas bacias hidrográficas dos Rios Sangão e Mãe Luzia, em função do lançamento de cargas ácidas oriundas de diversas bocas de mina abandonadas na região que são resultantes de um passivo ambiental de atividades minerárias pretéritas, utilizando o *software* SIAQUA-IPH.

Ao longo desta pesquisa, teve-se ainda como objetivos específicos: Realizar a discretização da bacia hidrográfica dos rios Sangão e Mãe Luzia; simular uma série de lançamentos de efluentes provenientes de bocas de mina abandonadas e que possuem escoamento de drenagem ácida, utilizando a metodologia do *software* SIAQUA-IPH; elaborar mapeamentos com a distribuição das concentrações simuladas na bacia hidrográfica após os lançamentos; comparar os parâmetros indicadores de qualidade da bacia após as contaminações, com aqueles estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 e; analisar a confiabilidade das informações obtidas com o *software* SIAQUA-IPH a nível de aplicação profissional.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 RECURSOS HÍDRICOS

A disponibilidade de água ocorre de diversas maneiras, apresentando-se especialmente no estado líquido, mas nem sempre possuindo qualidade para ser consumida pelos indivíduos (BRAGA *et al.*, 2005).

Os recursos hídricos - que são detentores de relevante importância para a sobrevivência dos seres vivos, pois estes dependem diretamente de sua conservação e do equilíbrio com a biodiversidade - são utilizados de maneira displicente, sendo comum o despejo de cargas de efluentes que afetam sua qualidade, especialmente em ambientes mais suscetíveis, como rios e lagos (MELLER *et al.*, 2017).

Atualmente, são as águas superficiais doces que aparecem como fonte primária para a utilização humana, e por isso, o conhecimento em relação ao ciclo hidrológico e aos demais fatores que interferem em sua qualidade e quantidade se fazem essenciais quando se almeja avaliar a disponibilidade hídrica de determinada região (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

Logo, a presença ou ausência de água influi diretamente na sustentabilidade da vida, o que faz com que seja imprescindível o conhecimento da distribuição das águas e dos parâmetros que possam vir a afetar diretamente em sua disponibilidade regional, pois é comum que se desenvolvam conflitos relacionados a sua utilização (DAVIS; MASTEN, 2016).

Dentre estes conflitos, pode-se exemplificar a necessidade de ofertar água para uma região que apresenta escassez deste recurso, o que pode levar à construção de um reservatório, o qual provocará impactos ambientais bastante significativos, ou mesmo, a simples diluição de despejos de origem humana em cursos hídricos naturais, que pode afetar outros usos da água em decorrência da alteração de sua qualidade (BRAGA *et al.*, 2005).

#### 2.1.1 Ciclo hidrológico

O fenômeno de circulação das águas, chamado de ciclo hidrológico, constituído pela evaporação, condensação, precipitação e escoamento, é

diretamente afetado pela energia solar, rotação da Terra e gravidade. O conjunto destes processos formam um ciclo fechado globalmente, mas que pode ser alterado regionalmente em função de variações em parte do conjunto, resultando em precipitações aquém das suportadas no local ou, muito inferiores às necessárias (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

Desta maneira, a energia solar é responsável por provocar a evaporação das superfícies líquidas e do solo, que compõem o vapor de água da atmosfera e, posteriormente, formam as nuvens. Quando precipitadas, parte da água é direcionada para regiões marinhas, outra parcela, em fração bem mais reduzida, evapora antes mesmo de atingir a superfície ou é transpirada por organismos vivos, especialmente as plantas. Do que resta, uma parte atinge os cursos hídricos superficiais e o restante, dependendo da permeabilidade do solo, infiltra-se no terreno (WILKEN, 1978).

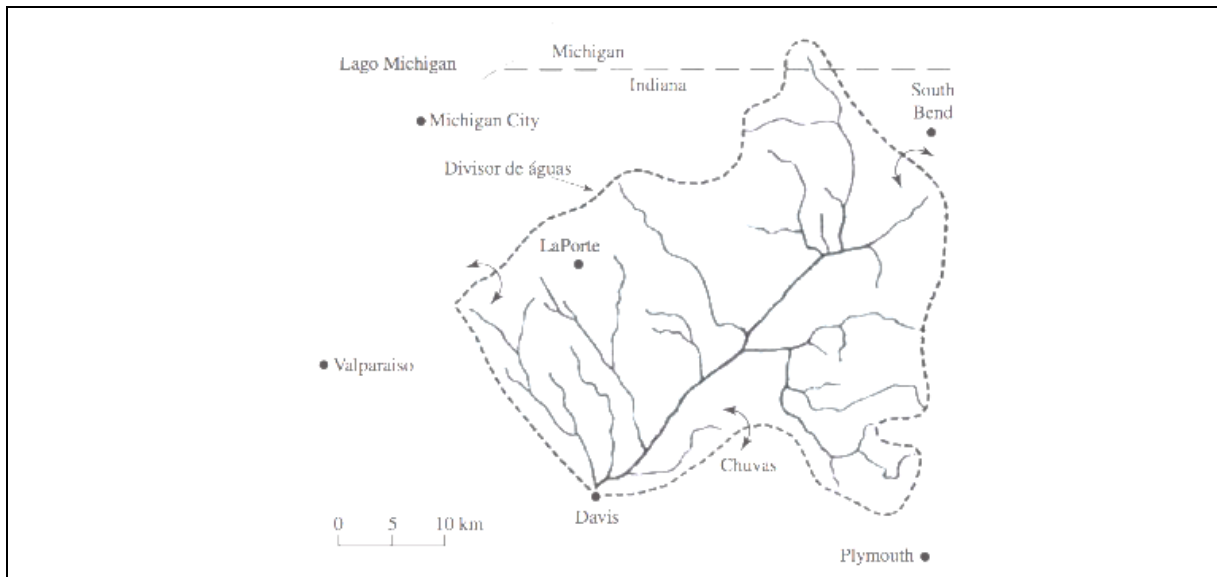
A partir da fração infiltrada, ocorre a recarga dos sistemas de águas subterrâneas que, por sua vez, quando possuem um fluxo horizontal, podem vir a alcançar as águas de superfície e serem uma porção significativa do fluxo de água de rios, lagos e oceanos (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2015).

A parcela de água captada para utilização no abastecimento das cidades, decorrendo de origem superficial ou subterrânea, com a finalidade de uso doméstico, industrial ou mesmo, para produção de energia, também volta em fração relevante para os cursos hídricos superficiais após passarem por alguns processos. Neste sentido, quando começa-se a analisar o ciclo hidrológico para suprir as necessidades humanas, os estudos ligados ao mesmo passam a se relacionar diretamente com as bacias hidrográficas (WILKEN, 1978).

### **2.1.2 Bacias hidrográficas**

Para os estudos necessários referentes ao desenvolvimento de certas atividades humanas, o ciclo hidrológico passa a ser analisado a partir de sistemas maiores e mais complexos, denominados de bacias hidrográficas ou de drenagem (figura 1), os quais contemplam lagos, rios, terreno circundante e até mesmo, as águas subterrâneas que se apresentam na região em observação (DAVIS; MASTEN, 2016).

**Figura 1** - Bacia Hidrográfica do Rio Kankakee, acima de Davis, Indiana.



**Fonte:** Adaptado de DAVIS; MASTEN, (2016).

Um dos fatores que denotam a importância dos estudos a nível de bacias hidrográficas passa pelo balanço de água no solo, pois são nas bacias que se pode identificar a distinção entre a água que irá infiltrar e aquela que permanecerá escoando superficialmente, que é uma condição afetada diretamente por toda alteração provocada na superfície terrestre, como desmatamentos e ocupação urbana, que resultam em modificações de disponibilidade hídrica, tanto em decorrência da quantidade, como também da qualidade (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

Estas previsões de escoamento e armazenamento da água dentro de uma bacia se tornam mais complexas em decorrência da influência de fatores distintos que alteram a permeabilidade do solo, o escoamento natural e o volume aprisionado em poças e depressões, mesmo considerando que a água que tende a fluir para dentro da bacia em questão se isola daquela que é direcionada para as demais bacias em função do seu divisor de águas. A densidade e o tipo de cobertura do solo, por exemplo, são aspectos que afetam consideravelmente a infiltração e a velocidade com que a água é transportada (DAVIS; MASTEN, 2016).

Logo, a definição simplória de uma bacia hidrográfica é de uma área que possui drenagem preferencial para um ponto de interesse, o que faz com que todo rio ou lago possua uma bacia de drenagem definida que é delimitada pelas cristas topográficas do terreno, sofrendo assim, ação direta da gravidade, o que retrata a

indispensabilidade do conhecimento da topografia da superfície nestes estudos (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2018).

A delimitação apropriada da bacia se faz indispensável quando é desejado estimar a disponibilidade hídrica de determinada região, tornando-se essencial a definição de um curso da água ou mesmo, de uma seção de referência, não necessitando que o local selecionado seja a foz do rio, mas sim, qualquer ponto intermediário deste (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

Não obstante, quando se deseja individualizar uma bacia, são necessários mapas de relevo com altimetria e escalas adequadas, podendo estas serem de 1 para 5.000, quando o estudo é referente a bacias urbanas, ou 1 para 10.000, para bacias localizadas em áreas rurais (WILKEN, 1978).

Nos dias atuais, os mapas de relevo utilizados nestes estudos são disponibilizados pelo IBGE, o qual oferta um banco de dados com cartas em diversas escalas, sendo aquelas que detêm um valor igual a 1 para 50.000, maior frequência de utilização, pois apesar de não serem as mais adequadas para alguns estudos específicos, elas são as que possuem uma aplicação mais ampla dentre as disponibilizadas. Outra fonte de dados do relevo são os Modelos Digitais de Elevação (MDE), que possuem escala global, são gratuitos e facilmente processados em programas computacionais (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

### **2.1.3 Usos e fontes de poluição das águas**

Em decorrência da relevância da água para a vida, este recurso é utilizado em uma série de atividades humanas, como uso doméstico, industrial, agropecuário e de demais entidades comerciais (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2018).

Quanto ao abastecimento humano, este pode ser considerado o uso com maior essencialidade em relação ao comparativo com os demais, uma vez que ele afeta diretamente a qualidade de vida da população, devendo portanto, ter características sanitárias e toxicológicas condizentes, não apresentando organismos patogênicos ou demais substâncias tóxicas (BRAGA *et al.*, 2005).

Em relação ao uso preponderante em escala global, constata-se que cerca de 70% da água doce é ainda destinada para atividades agrícolas, sendo seguida do uso industrial, com 20%. Estes índices muito indicam a maneira como a água é utilizada e por quais parâmetros ela acaba sendo poluída, o que permite a

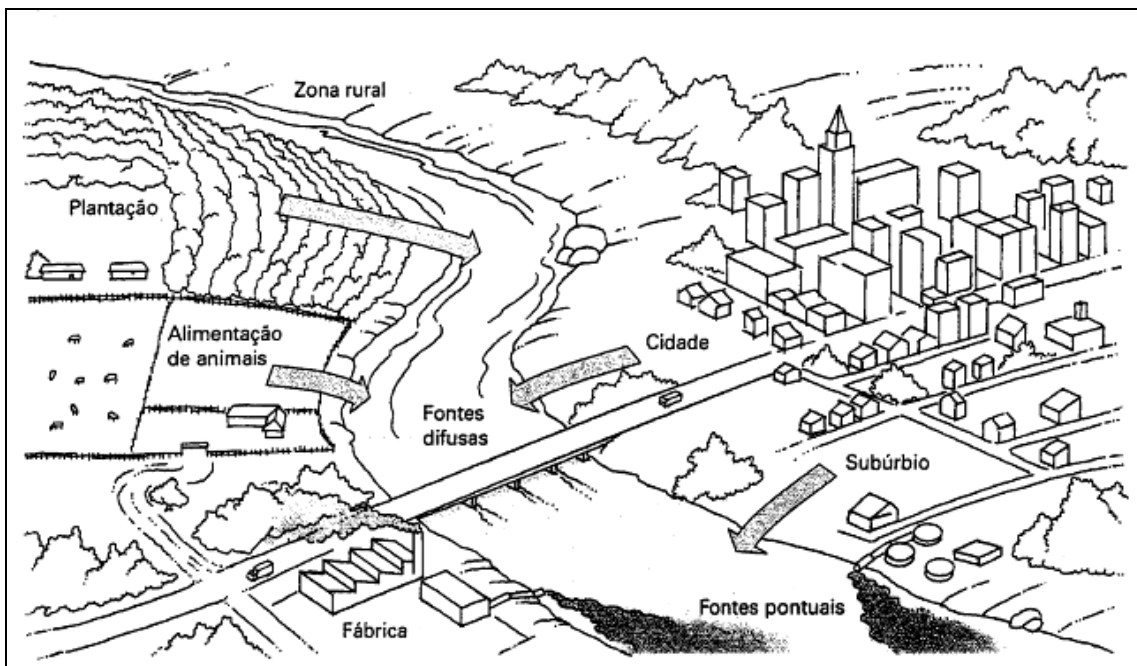
construção da denominada pegada hídrica, que estima o volume de água necessário para dar suporte às atividades humanas locais ou mundiais (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2018).

#### 2.1.4 Poluição e parâmetros de qualidade da água

A alteração das características naturais da água, tanto em relação a seus aspectos fisiológicos quanto aos estéticos, que são oriundos de atividades antrópicas ou mesmo, naturais, é definida como poluição. O que indica que não necessariamente é a aparência que demonstra o grau de limpidez do recurso, podendo-se associar a noção de poluição com o possível uso que pode ser realizado da água (BRAGA *et al.*, 2005).

A origem dos poluentes que chegam nos ambientes aquáticos é bastante relevante quando se realizam estudos sobre a qualidade das águas. Com isso, as fontes dos contaminantes podem ser classificadas de duas maneiras: pontuais, que são locais fixos, como tubulações instaladas em ambientes urbanos ou; não pontuais, como o próprio escoamento superficial oriundo das águas das chuvas (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2015), como demonstrado na figura 2.

**Figura 2** - Fontes de poluição pontuais e difusas.



Fonte: Adaptado de Braga *et al.*, (2005).

Neste sentido, considerando a diversidade de contaminantes e de fontes poluidoras, não existe água totalmente pura, logo, sua qualidade se relaciona diretamente com sua adequação a uma série de parâmetros que apontam se sua usabilidade não trará consequências quanto ao uso desejado. Ou seja, a adequação do recurso refere-se diretamente com o respeito de um conjunto de condições que permitam a satisfação no seu uso sem resultar em efeitos adversos (BATTALHA; PARLATORE, 1977).

Então, as adversidades provocadas por um poluente em corpos hídricos são definidas a partir da natureza do agente poluidor, do caminho que este percorrerá, e do uso para o qual a água em questão é destinada (BRAGA *et al.*, 2005), por isso, a Resolução CONAMA nº 357/05, classifica os corpos de água a partir de uma série de parâmetros pré-definidos, indicando os possíveis usos para eles, como pode ser observado no quadro 1, que traz consigo as classificações referentes aos ambientes de águas doces, ou seja, com salinidade igual ou inferior a 0,5% (BRASIL, 2005).

**Quadro 1** - Classificação dos corpos hídricos de acordo com a sua utilização.

Tipo de água	Classe	Uso
Doce	Especial	Consumo humano após desinfecção; preservação das comunidades aquáticas; e; de ambientes aquáticos em áreas de proteção integral.
	I	Consumo humano após tratamento simplificado; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação de hortaliças e frutas que são ingeridas cruas; e; proteção das comunidades aquáticas em Terras indígenas.
	II	Consumo humano após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e ambientes de lazer com os quais o público possa vir a ter contato direto; aquicultura; e; atividade de pesca.
	III	Consumo humano após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário; e; dessedentação de animais.
	IV	Navegação; e; harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado de BRASIL, (2005).

Assim, a classe especial é a que detém melhor qualidade, enquanto que as classes 3 e 4 são aquelas que necessitam, obrigatoriamente, de um tratamento mais complexo quando seu uso é relacionado, por exemplo, com o abastecimento humano (MELLER, 2017).

Todavia, para definir a classe dos recursos hídricos, são observadas algumas características físicas e organolépticas, como cor, turbidez e temperatura; químicas, como pH, alcalinidade, ferro, manganês e demanda bioquímica de oxigênio (DBO); biológicas, como bactérias, vírus, protozoários e algas, e; radioativas, como radiação alfa, beta ou gama (CAPAZ; NOGUEIRA, 2014).

Desta forma, a poluição das águas pode ser classificada como química, térmica ou biológica, e seu controle está associado prioritariamente a preocupação com riscos à saúde humana, sendo que, nos locais onde este aspecto já se encontra superado, os cuidados se referem à busca pela conservação, estética e preservação da beleza cênica dos recursos hídricos disponíveis (CALIJURI; CUNHA, 2013).

#### 2.1.4.1 Lançamento de efluentes

A água necessária para realização de inúmeras atividades diárias do ser humano, após ser utilizada, adquire características – químicas, físicas e/ou biológicas - distintas daquelas de sua composição inicial, passando a ser denominada de efluente ou, água residuária (FINKLER, 2018).

Outrora, estes efluentes oriundos de atividades domésticas ou industriais, eram considerados um problema cuja solução passava por um processo simples e barato, o que levava a despejos em corpos hídricos superficiais sem nenhuma forma de controle e acarretava em efeitos indesejáveis ao meio ambiente (DAVIS; MASTEN, 2016).

Desta maneira, foram desenvolvidas técnicas de tratamento para estes efluentes com base em suas próprias características, o que passou primordialmente pelo conhecimento de suas fontes, pois com base na compreensão do processo gerador, é possível definir previamente quais são as características do efluente gerado e, prever a alteração que este provocará no ambiente em que será inserido (FINKLER, 2018).

Assim, pode-se adotar a classificação para os efluentes descritas no quadro 2:

**Quadro 2** - Classificação de efluentes a partir da fonte geradora.

Tipo de efluente	Origem / Características
Doméstico	Águas utilizadas para fins higiênicos, como sanitários, cozinhas e lavanderias, oriunda de estabelecimentos comerciais, públicos, residências, etc.
Industrial	Resíduos líquidos com características específicas, gerados diretamente de processos industriais.
Infiltração e vazões adicionais	Águas de infiltração que penetram em sistemas de esgotamento por inúmeros motivos, incluindo também, águas pluviais que são direcionadas para rede coletora.
Pluvial	Água oriunda da pluviometria local que cai sobre o solo, tendo uma parcela que tende a escoar pela superfície, carregando consigo areia, terra, folhas e demais resíduos.
Sanitário	Despejos líquidos residenciais, comerciais e águas de infiltração na rede coletora que, podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos.

Fonte: Adaptado de Brasil, (2011) e Mendonça; Mendonça, (2017).

E, em decorrência do potencial degradador que as emissões tem diante do meio ambiente, no Brasil existem Legislações que dispõem especificamente sobre os padrões de lançamento de efluentes que, quando aliadas a técnicas efetivas de controle, são capazes de evitar a degradação da qualidade dos recursos hídricos (FAN, 2013).

#### 2.1.4.1.1 Tipos de lançamentos de poluentes

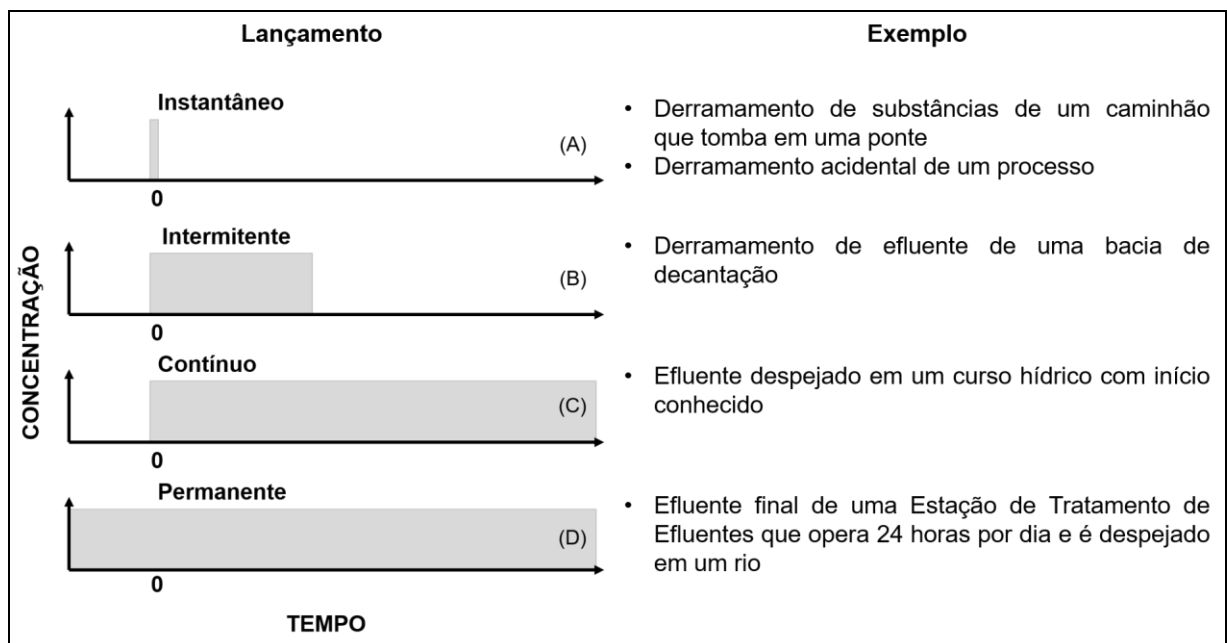
As adversidades provocadas por distintos lançamentos em corpos hídricos, é diretamente relacionada com as substâncias que estão sendo inseridas no meio, com o caminho que estas percorrem, do uso que se faz da água e, da duração e volume da respectiva emissão (BRAGA *et al.*, 2005).

Desta maneira, os poluentes inseridos em corpos hídricos podem ter sua origem de fontes pontuais, quando as substâncias atingem o recurso com localização definida, de forma concentrada e, normalmente em regime contínuo, ou, de fontes difusas, sendo geradas em extensas áreas e chegando a bacia de drenagem de forma intermitente, o que dificulta a definição de uma localização específica, medição e controle (LIMA *et al.*, 2016).

Assim, quando se almeja a realização de simulações da interferência de lançamentos de poluentes em corpos hídricos, além destas informações, aquelas que se referem a sua duração detêm função relevante para aplicabilidade de modelos matemáticos (FLECK; TAVARES; EYNG, 2013).

Neste sentido, pode-se considerar que um despejo seja instantâneo, tendo duração reduzida em comparação com o tempo de análise; intermitente, com período razoável e finito; contínuo, sabendo quando o lançamento se inicia, porém desconhecendo quando ele termina ou; permanente, quando não se tem definidos os tempos inicial e final (FAN, 2013), como demonstrado na figura 3:

**Figura 3** - Exemplificações de diferentes tipos de lançamentos.



Fonte: Adaptado de Fan, (2013).

A análise de como o despejo é realizado se faz importante, uma vez que ele interfere nos processos de advecção, dispersão e decaimento das substâncias, concomitantemente com outros parâmetros, como a geometria do rio, vazão e velocidade do mesmo (GIORI, 2011).

#### 2.1.4.2 Padrões de potabilidade

O controle da qualidade da água disponível para o consumo humano, relaciona-se diretamente com o conceito de potabilidade, que estabelece valores

máximos permissíveis (VMP) para indicadores físicos, químicos e biológicos, de maneira a não trazerem prejuízos à saúde humana (BRAGA *et al.*, 2005).

Desta forma, para que se consiga atingir os padrões estipulados, é fundamental que se tenha um controle do que é lançado nas bacias de drenagem, pois são as características das mesmas que definirão o tratamento necessário para que se alcance o nível de potabilidade necessário (BRASIL, 2006).

Assim, quando se altera significativamente as características da qualidade da água bruta presente nos mananciais, são necessárias adequações no processo de tratamento da água, o que implica em reflexos econômicos, por isso, assegurar a estabilidade da qualidade do recurso bruto por meio do controle da poluição, é fundamental para que o sistema projetado possibilite a obtenção de água nas condições adequadas (BRAGA *et al.*, 2005).

Todavia, apesar de se abordar constantemente o conceito de potabilidade quando se almeja evitar alterações prejudiciais aos corpos hídricos, as mesmas também implicam em prejuízos diretos à biota aquática, aos recursos naturais paisagísticos, às atividades sociais, econômicas, etc. (BRASIL, 2006).

Neste sentido, no Brasil, é a Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde que traz consigo os padrões de potabilidade vigentes em todo território nacional, a qual é efetivada através da Portaria de Consolidação nº 05 de 28 de setembro de 2017 (BRASIL, 2017).

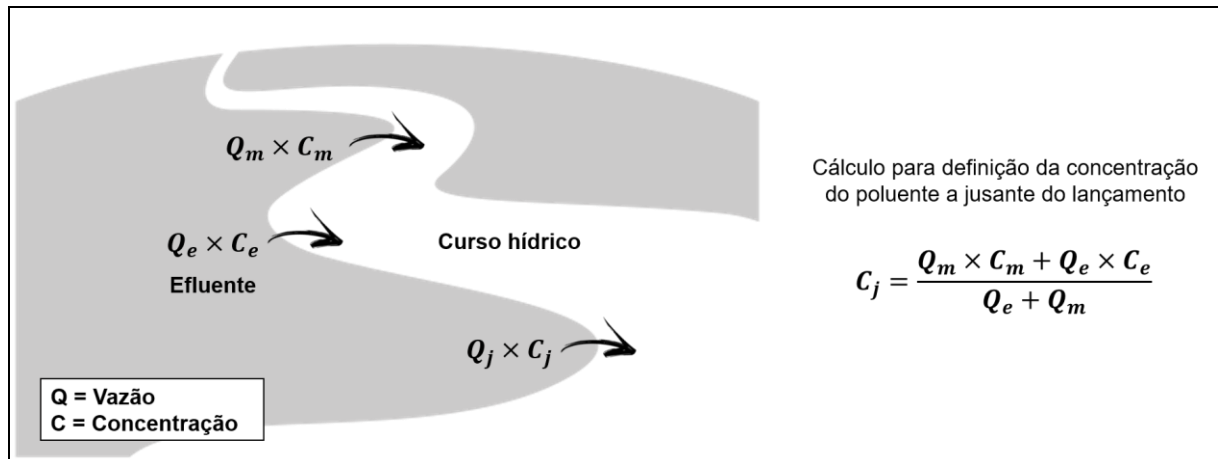
### **2.1.5 Poluentes no meio aquático**

A integração de modelos matemáticos junto ao SIG é um meio que, através da formação de banco de dados e processamento de informações, permite que se obtenha uma descrição espacial da região abordada com uma riqueza de detalhes, podendo inclusive, prever o comportamento dos poluentes no meio hídrico a partir dos dados obtidos (FAN, 2013).

Este comportamento, tende a ser induzido por uma série de mecanismos físicos, químicos e biológicos que existem na natureza, como por exemplo, o próprio processo de diluição que faz com que uma substância qualquer que seja despejada no meio aquático tenha sua concentração original reduzida em função do processo de mistura do despejo com a água do corpo hídrico (BRAGA *et al.*, 2005).

E, considerando a equação da continuidade para prever a concentração do poluente no corpo hídrico, percebe-se que o impacto do poluente será menor, quanto maior for a vazão da bacia de drenagem (VESILIND; MORGAN; HEINE, 2018), como demonstrado na figura 4.

**Figura 4** - Diluição de efluentes em corpos hídricos superficiais.



Fonte: Adaptado de Braga *et al.*, (2005).

Quanto à ação hidrodinâmica das águas, esta faz com que o próprio movimento de transporte do poluente, entre a região de despejo e outro local qualquer dentro da bacia de drenagem, faça com que os poluentes passem por processos de advecção e dispersão, ou seja, estes se movem verticalmente, durante a infiltração e, horizontalmente, de acordo com a direção do escoamento das águas (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2018).

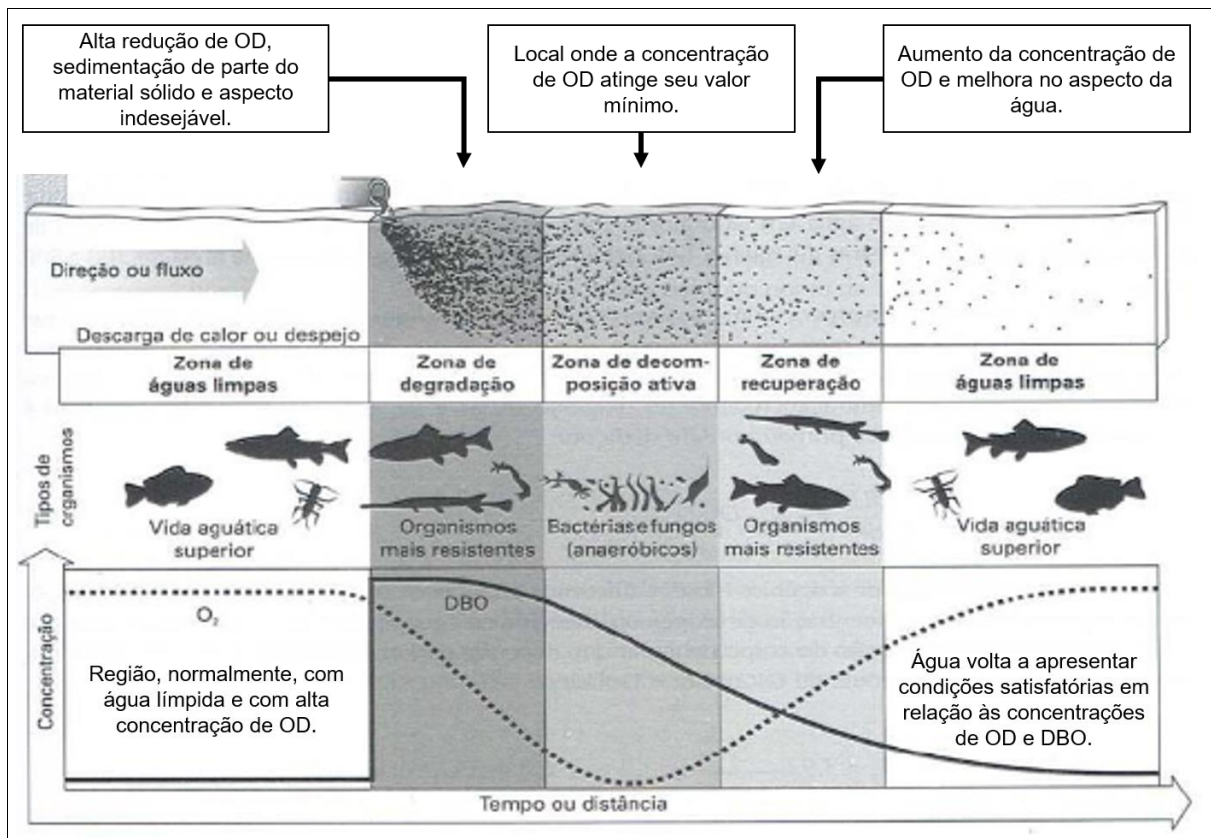
Outros fatores que interferem significativamente no comportamento dos poluentes em corpos hídricos, são: temperatura, que tem a capacidade de alterar a solubilidade do meio de acordo com a modificação de seus próprios valores; a luz, que tem sua incidência no meio como de valor fundamental para a existência da vida marinha e que, pode ser reduzida em função do aumento da turbidez e; a própria gravidade, que influi diretamente na sedimentação de substâncias no meio aquático (BRASIL, 2014).

Quanto a deposição, esta merece especial atenção, uma vez que é através deste processo que os sedimentos têm sua composição inicial alterada e acabam retratando as condições sobre as quais o ambiente foi submetido, especialmente quanto às influências decorrentes de atividades antropogênicas (ALVES *et al.*, 2010).

Mecanismos que muito interferem no comportamento dos poluentes no meio aquático, são também, os bioquímicos, pois existe um equilíbrio natural neste ecossistema, entre seres fotossintetizantes e consumidores, todavia, quando matéria orgânica biodegradável é lançada neste ambientes, organismos decompositores tendem a consumir o oxigênio dissolvido (OD) e, conseqüentemente, a reduzir sua concentração, fazendo com que os demais seres comecem a ter sua sobrevivência comprometida (MIHELICIC; ZIMMERMAN, 2018).

Todavia, o ambiente poluído com altas concentrações de matéria orgânica, consegue se recuperar através da autodepuração, que é realizada por meio de processos físicos, químicos e biológicos (BRAGA *et al.*, 2005), como pode ser observado na figura 5:

**Figura 5** - Esquema simplificado do processo de autodepuração.



Fonte: Adaptado de Braga *et al.*, (2005).

### 2.1.6 Recursos hídricos no estado de Santa Catarina

O desenvolvimento de muitas atividades econômicas resulta em alterações que, se não remediadas, provocam severos danos ao meio ambiente

(FERNÁNDEZ; ACCIOLI,1983), que são consequências originadas da disposição em ambientes inapropriados de resíduos sólidos ou de efluentes domésticos e industriais; do vazamento de produtos químicos de tanques de armazenamento; de atividades minerárias; ou mesmo; de atividades agropecuárias (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Neste sentido, o sul catarinense que outrora tinha sua economia movimentada especialmente em função da agricultura, começou a ter a exploração minerária como principal atividade econômica, fator que trouxe consigo um aumento na degradação ambiental local, resultando em consequências, principalmente, para seus recursos hídricos (ALEXANDRE, 1999), como elucidado na figura 6.

**Figura 6** - Degradação de curso hídrico, afetando fauna e flora locais.



Fonte: Do autor, (2019).

Embora as bacias hidrográficas da região tenham sua degradação influenciada por uma série de atividades, registros históricos indicam que a principal delas foi a mineração de carvão, areia, fluorita, argila e cascalho. Isto ocorreu muito em função da criação da Comissão Executiva do Plano do Carvão Nacional (CEPCAN), em 1953, que gerou uma política de incentivos à extração mineral (CITADIN, 2014).

A mineração, quando praticada sem os devidos cuidados ambientais, é uma fonte de poluição dos recursos hídricos bastante significativa, pois tanto quando

ela ocorre no subsolo ou a céu aberto, ela tende a expor rochas mineralizadas que normalmente contém metais pesados, permitindo o contato destas com a água em movimento, o que resulta em uma série de alterações nas características da mesma, destacando-se o aumento de sua acidificação (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Na região carbonífera de Santa Catarina, o fator citado pode ser facilmente observado, em função de minas desativadas ou em funcionamento que exploram carvão, ou outras substâncias minerais, e que ainda contribuem com drenagem ácida para alguns cursos hídricos (FERNÁNDEZ; ACCIOLI, 1983).

Assim, os rios e córregos da região que se encontram poluídos apresentam, não raramente, um pH entre 2 e 4 unidades, altas concentrações de chumbo, zinco, cobre, manganês e sulfatos dissolvidos, ultrapassando os limites estabelecidos na Legislação, além de elevada carga de acidez (ALEXANDRE, 1999).

Estas características acabaram por fazer com que os recursos hídricos da região, enquadrassem-se de maneira majoritária, como gravemente degradados, assim como em algumas outras regiões do mundo, mas, com o agravante de que Santa Catarina pode ser considerada muito rica, quando se avalia a disponibilidade de água por habitante em relações a outros locais, o que acaba intensificando a gravidade dos impactos ambientais que se apresentam (GOMES; BARBIERI, 2004).

## 2.2 GESTÃO AMBIENTAL DE RECURSOS HÍDRICOS

A gestão ambiental é regida por um conjunto de ações articuladas que visam a realização de um determinado objetivo, tornando-se indispensável em qualquer atividade que dependa do equacionamento de fatores favoráveis e desfavoráveis (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Quando delimitada a uma análise dos recursos hídricos, ela pode ser compreendida a partir da definição do uso da água, que tem uma determinação baseada em fatores sociais, econômicos e culturais; localização; maneiras disponíveis de captação e; tratamentos necessários (BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Desta forma, surgem políticas que desempenham função primordial para interação das diferentes utilizações deste recurso, visando garantir o uso de técnicas de gestão que permitam o melhor aproveitamento da água, não em função de

objetivos individuais, mas sim na procura pelo máximo benefício do recurso (CARBONARI, 1997).

E, como constatação da busca por uma gestão adequada das águas, existe a Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei 9.443/97), que logo em seu primeiro capítulo já define que a gestão deste recurso deve proporcionar sua multiplicidade de usos, devendo esta ser descentralizada, contando com a participação do Poder Público, das comunidades e dos próprios usuários, e sendo ainda, realizada sempre a nível de bacia hidrográfica (BRASIL, 1997).

Nessa perspectiva, são as ações de gestão ambiental que são capazes de garantir que não ocorram alterações nas condições de uma bacia hidrográfica, que gerem situações indesejáveis e resultem na modificação de sua forma de utilização, devido ao comprometimento de sua qualidade ou quantidade (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Para este objetivo, os instrumentos de gestão que hoje são utilizados, resumem-se: no Plano de recursos hídricos, na outorga de direito e na cobrança pelo uso da água, no enquadramento dos corpos hídricos e, nos sistemas de informações sobre estes recursos (BITTENCOURT; PAULA, 2014).

E neste contexto, as técnicas de análise espacial ganham função bastante relevante, já que estas contribuem significativamente com os instrumentos de gestão ambiental, especialmente no que se refere a monitoramentos e investigações de passivos e riscos ambientais. Desta forma, os sistemas de informação geográfica – SIG, constituem ferramentas poderosas quando se deseja gerenciar e analisar dados que possuam dependência direta de sua localização (CALIJURI; CUNHA, 2013).

### 2.3 GEOPROCESSAMENTO E MÉTODOS DE SIMULAÇÃO

O conjunto de técnicas, métodos e ferramentas influenciadas por um embasamento matemático e computacional, que juntos tratam da informação geográfica e permitem uma análise espacial de diversos recursos, é denominado de geoprocessamento (IBRAHIN, 2014).

Esta tecnologia de manipulação de dados, muito usufrui de bases cartográficas, topográficas, de sensoriamentos remotos (SR) e, de sistemas de posicionamento global (GPS) e de informação geográfica (SIG), sendo o último

responsável por permitir que análises mais complexas sejam realizadas, e que dados de diferentes fontes sejam integrados a partir da criação de um banco de dados georreferenciado (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

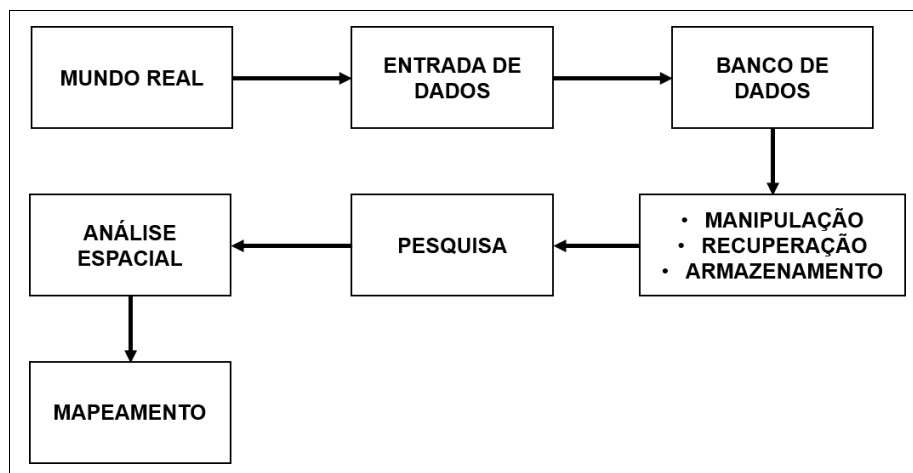
Desta forma, o geoprocessamento é um trabalho interdisciplinar que visa a representação de dados espacialmente referenciados através de computadores, sempre buscando a melhor representação computacional a partir do objetivo da aplicação (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

Assim, tudo que existe pode ser georreferenciado, como prédios, árvores, fábricas, ruas, etc., facilitando uma infinidade de estudos que tenham de ser realizados e, otimizando os resultados obtidos com os mesmos, uma vez que existe uma maior possibilidade de acerto nas decisões que devem ser tomadas em função da apuração das análises executadas (IBRAHIN, 2014).

### 2.3.1 Sistema de Informações Geográficas (SIG)

A aplicabilidade do SIG pode ocorrer em áreas como agricultura, meio ambiente, obras de engenharia, infraestrutura pública, turismo, etc., pois este é uma ferramenta de auxílio para tomada de decisões, tendo seus dados manipulados, armazenados e editados de acordo com o interesse do usuário, mas sempre utilizando informações da superfície terrestre (IBRAHIN, 2014), como ilustrado a seguir:

**Figura 7** - Conceito de manipulação de dados em SIG.



Fonte: Adaptado de IBRAHIN, (2014).

Desta maneira, pode-se indicar ao menos três grandes utilidades para a aplicabilidade de um SIG, sendo estas: a produção de mapas; suporte para análises espaciais de fenômenos específicos e; a criação de banco de dados geográficos com função de armazenamento de informações espaciais, que podem ser trabalhados de forma integrada, através de algoritmos de manipulação e análise (ASSAD; SANO, 1998).

Assim, por meio da utilização de informações referentes sobre o que ocorre na superfície terrestre, o SIG se torna uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões, o que acaba atraindo profissionais de diferentes áreas e incentiva o desenvolvimento contínuo de novos programas de manipulação de dados, com aprimoramentos ou gerações de novas funções (IBRAHIN, 2014).

#### 2.3.1.1 Programas de SIG

Existem inúmeras plataformas de geoprocessamento nos dias atuais, cada qual trazendo consigo pontos fortes e fracos em dadas áreas, podendo estas serem divididas entre aquelas comercializadas e livres (de código aberto), sendo as primeiras, as que apresentam uma maior diversidade de ferramentas e que dão melhor suporte para operações mais pesadas, ou seja, em aplicações de grandes bancos de dados em áreas mais extensas (FAN, 2013).

Ademais, as aplicações comercializadas, além de apresentarem custos para que suas licenças possam ser obtidas, também entregam uma interface para trabalho mais organizada e amigável, além de oferecerem uma equipe de suporte que auxilia na aplicação das ferramentas disponibilizadas, enquanto que, os programas livres ou de código aberto, não apresentam custos para sua aquisição, e tem como principal benefício, uma comunidade ativa de utilizadores que compartilham suas experiências, contribuindo com o desenvolvimento da própria plataforma, todavia, elas normalmente demandam de maiores conhecimentos em informática e programação (SILVA *et al.*, 2016).

Mas, algumas ferramentas costumam integrar qualquer programa de SIG, mesmo com cada um destes tendo suas peculiaridades, como é o caso dos sistemas de aquisição de conversão de dados, os próprios banco de dados de informações espaciais e de atributos próprios, os sistemas que possibilitam as

análises geográficas, o processamento de imagens, de apresentação cartográfica, de estatística e, de modelagem digital de terrenos (MDE) (IBRAHIN, 2014).

E, dentre todas as ferramentas disponíveis, a que atualmente mais se destaca no mercado foi desenvolvida pelo *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), denominada de *ArcGIS*, o qual é um dos programas mais completos desenvolvidos até então, possibilitando uma grande variedade de aplicações (SILVA *et al.*, 2016).

Todavia, existem outros programas muito utilizados atualmente, os quais são descritos no quadro 3:

**Quadro 3** - Descrição dos principais programas de SIG.

Software	DESCRIÇÃO			
	Desenvolvedor	Licença	Plataforma	Idioma
<b>Mapinfo</b>	<i>Pitney Bowes</i>	Comercializada	Windows	Inglês
<b>ArcGIS</b>	ESRI	Comercializada	Windows	Inglês
<b>GEOMEDIA</b>	<i>Hexagon Geospatial</i>	Comercializada	Windows	Inglês
<b>gvSIG</b>	<i>gvSIG Association</i>	Livre	Múltiplas	Chinês, espanhol, inglês
<b>MapWindow</b>	<i>MapWindow Open Source Team</i>	Livre	Windows	Inglês
<b>Quantum GIS</b>	Gary Sherman	Livre	Múltiplas	Inglês
<b>SPRING</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil)	Livre	Múltiplas	Inglês, português
<b>SAGA GIS</b>	Instituto de Geografia da Universidade de Hamburgo (Alemanha)	Livre	Múltiplas	Inglês
<b>TerraView</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil)	Livre	Múltiplas	Espanhol, inglês, português
<b>Transcad</b>	Geológica	Comercializada	Windows	Inglês
<b>VisualSIG</b>	Aldape	Livre	Windows	Inglês, português

Fonte: Adaptado de IBRAHIN, (2014) e SHEKAR; XINONG, (2008).

Dentre estes programas, cabe destacar o *MapWindow GIS*, que é um sistema de informações geográficas de código aberto, que permite ser constantemente reprogramado visando a execução de tarefas distintas, sendo também adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos como

uma plataforma para o seu sistema de análise de bacias hidrográficas (SHEKAR; XIONG, 2008).

Como o *MapWindow GIS* é um programa de código aberto, ele permite que novas aplicações sejam desenvolvidas no mesmo, como modelos hidrológicos parecidos com o SIAQUA-IPH, criado pelo Instituto de Pesquisas de Hidrologia de grande escala da Universidade federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (FAN, 2013).

### **2.3.2 Modelos hidrológicos e de qualidade da água integrados ao SIG**

Modelos podem ser entendidos como maneiras de representação da realidade de forma simplificada, que possibilitam o entendimento de uma série de processos que ocorrem sobre um local, sendo muito utilizados em estudos ambientais, uma vez que facilitam a compreensão de impactos relacionados com a execução de determinadas atividades (RENNÓ; SOARES, 2000).

Desta maneira, quando se deseja estudar o comportamento de dadas substâncias dentro de bacias hidrográficas, o estudo de modelos hidrológicos se faz interessante, pois estes podem ser uma importante fonte de informação quantitativa da água, o que é um pré-requisito para que se consiga analisar o recurso hídrico de forma qualitativa (FAN, 2013).

Assim, quando se deseja realizar uma avaliação ambiental de bacias hidrográficas, é fundamental que sejam considerados os mais diversos agentes, tanto naturais quanto antrópicos, que tendem a trazer efeitos para o corpo hídrico, como o comportamento pluviométrico regional, os usos da água e as obras hidráulicas existentes, que interferem sumariamente nas análises quantitativas e, as fontes de poluição e seu transporte, para avaliações qualitativas (LARENTIS; COLLISCHONN; TUCCI, 2008).

Logo, quando se realizam trabalhos de simulação do comportamento de substâncias em bacias hidrográficas, são utilizadas uma série de equações, juntamente com dados específicos de entrada, como variáveis climáticas e de cobertura do solo da região estudada, resultando em dados hidrológicos ao longo de vários pontos da bacia de drenagem em análise (FAN, 2013).

Em relação aos modelos de qualidade da água aplicados na escala de bacia hidrográfica, estes detêm como principal vantagem a oportunidade de estimar os efeitos de uma série de empreendimentos, em cenários de desenvolvimento

distintos, de maneira cumulativa ao longo do curso hídrico (LARENTIS; COLLISCHONN; TUCCI, 2008).

E, a integração de modelos hidrológicos e de qualidade da água com SIG, possibilita que uma quantidade elevada de informações seja gerada, estando estas majoritariamente relacionadas com posições geográficas específicas, reduzindo a subjetividade dos resultados obtidos e potencializando a possibilidade da realização de simulações frente a situações específicas (FERREIRA, 2017).

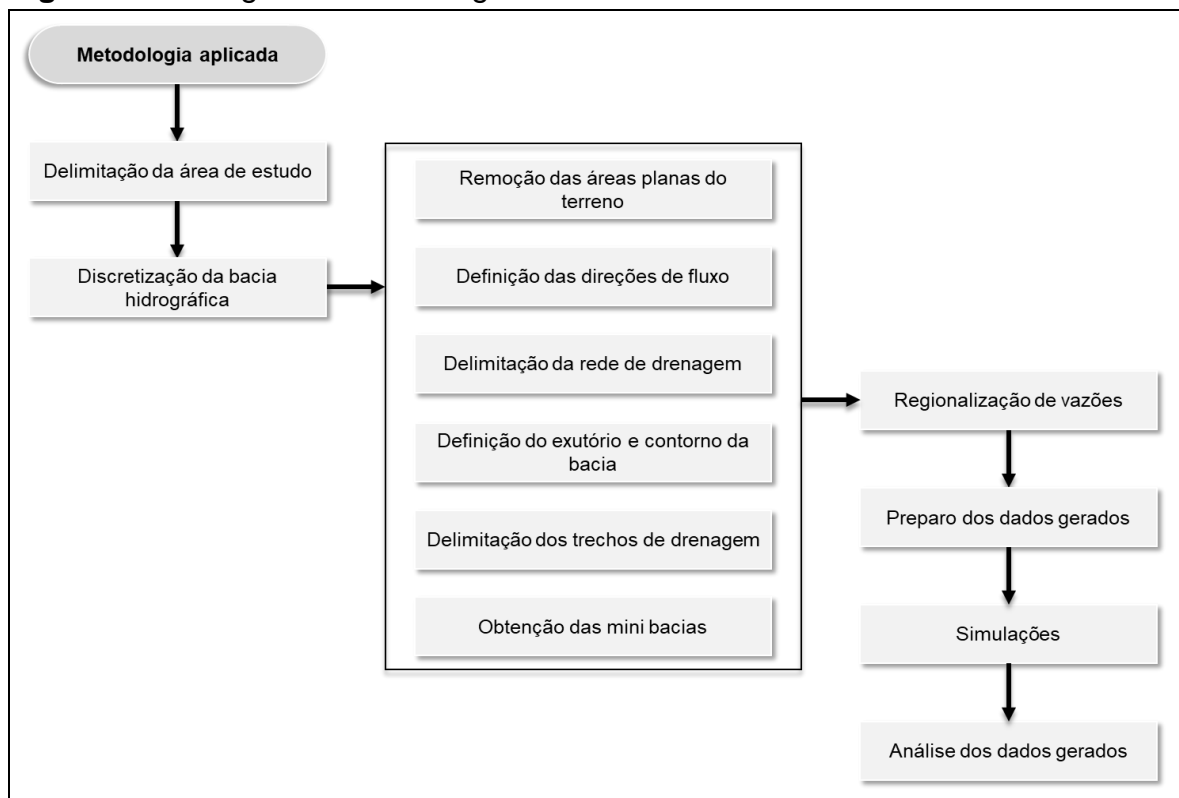
### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 LINHAS GERAIS

O presente trabalho se desenvolveu como uma pesquisa aplicada, pois as simulações realizadas permitiram analisar um modelo de estudo de maneira a constatar sua viabilidade de aplicação em trabalhos profissionais, visando uma abordagem quali-quantitativa, analisando objetivamente a alteração nos valores dos parâmetros dos cursos hídricos superficiais estudados, concomitantemente com uma análise da variação de sua qualidade a partir do que é estipulado na Resolução CONAMA 357/05.

A pesquisa ainda pode ser caracterizada como descritiva, pois foram apresentados os aspectos correlatos com os dados coletados referente aos parâmetros dos efluentes que tiveram seus lançamentos simulados no curso hídrico, realizando uma análise e interpretação dos mesmos quanto a sua interferência na bacia hidrográfica afetada e, seguindo as etapas descritas na figura 8.

**Figura 8** - Fluxograma metodológico.



Fonte: Do autor, (2019).

E, para que fosse possível atingir os objetivos estipulados, primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica quanto aos aspectos que interferem diretamente nas bacias hidrográficas, impactos de atividades de beneficiamento de minérios em relação aos recursos hídricos e, relevância da aplicação de uma adequada gestão ambiental acoplada à sistemas de informação geográfica.

### 3.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Uma das etapas principais do presente estudo, foi a delimitação da área de drenagem e definição da situação problema a ser analisada por meio de simulações, contemplando diferentes situações, de modo que fosse possível constatar, principalmente, o real potencial poluidor, no caso de uma série de descargas ácidas constantes de bocas de minas não recuperadas, em escala relevante, dentro da bacia hidrográfica dos rios Sangão e Mão Luzia, proveniente do passivo ambiental resultante de atividades minerárias passadas.

Nesta etapa, foi obtido um modelo digital de elevação (MDE) da região, com base no mapa de relevo do Brasil disponibilizado pela Embrapa, em seu *site* oficial.

### 3.3 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Por conseguinte, os trabalhos foram voltados para a discretização da bacia de drenagem selecionada, utilizando o MDE obtido anteriormente, por meio do *Arc Hydro Tools*, conforme o tutorial de aplicação disponibilizado pela *ESRI* e, as instruções referentes ao assunto disponibilizadas por Fleischmann, Fan e Collischonn (2013).

O procedimento base exemplificado se inicia com a remoção das áreas planas do terreno com cotas inferiores à vizinhança, por meio da ferramenta *Fill Sinks*, o que se faz necessário em decorrência destes fatores serem resultantes, majoritariamente, de erros presentes no MDE.

Após este preparo inicial, foram definidas as direções de fluxo de cada elemento da matriz do MDE, através da ferramenta *Flow Direction*, sendo possível, no momento seguinte, calcular as áreas de drenagem dentro da bacia a partir deste último arquivo.

Com as áreas de drenagem calculadas, foi possível delimitar toda rede de drenagem da bacia, com auxílio da ferramenta *Stream Definition*, e partir deste documento, foi realizada uma delimitação do contorno da bacia, que corresponde a área de interesse no estudo, sendo este procedimento realizado através das ferramentas *Batch Point Generation* e *Batch Subwatershed Delineation*.

Visando reduzir o tempo de processamento e melhor organizar o projeto que estava sendo desenvolvido, todos os arquivos gerados até aqui tiveram sua área delimitada a partir do contorno do arquivo *shapefile* gerado através da ferramenta *Batch Subwatershed Delineation*, sendo este último processo realizado através da ferramenta *Extract By Mask*.

A próxima etapa foi realizar a definição de cada trecho de drenagem da bacia hidrográfica, utilizando a ferramenta *Stream Segmentation*, sendo utilizados os arquivos que continham as informações de direções de fluxo e rede de drenagem delimitada.

Com a obtenção dos trechos de drenagem e as direções de fluxo, pode-se obter um mapa de mini bacias, o qual indica a área de drenagem de cada segmento da bacia, fazendo com que a mesma ficasse fragmentada em pequenos polígonos. Este procedimento foi realizado com a ferramenta *Catchment Grid Delineation*.

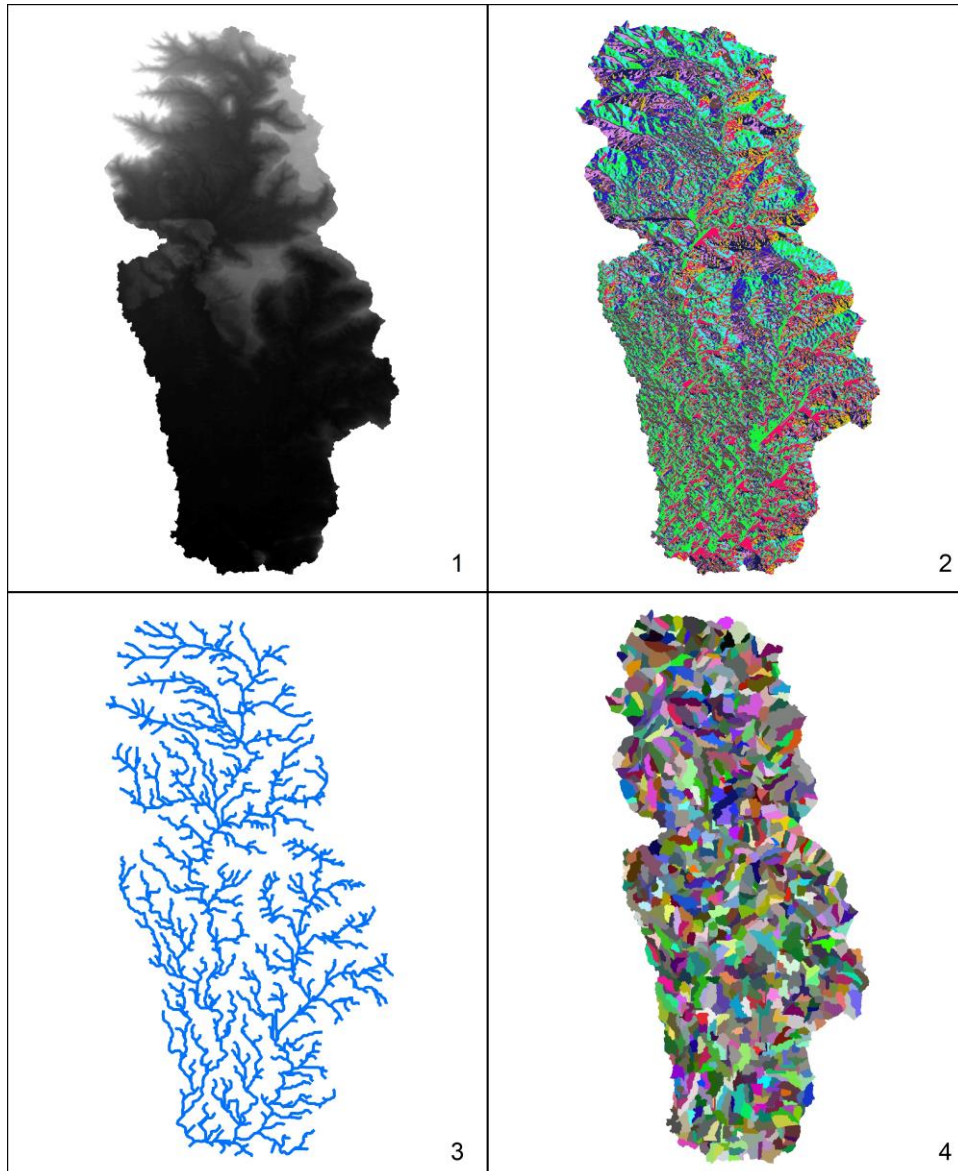
A partir do mapa de mini bacias, foi utilizada a ferramenta *Catchment Polygon Processing*, obtendo-se um novo mapa, mas agora apenas com o contorno de cada pequena região delimitada e, utilizando as informações de direções de fluxo e a delimitação de cada trecho do curso hídrico, foi obtido um mapa da rede drenagem em formato vetorial, através da ferramenta *Drainage Line Processing*.

Após todas estas informações terem sido geradas, pode-se criar um mapa com as bacias localizadas a montante de cada mini bacia, tendo sido utilizadas as informações de delimitação da rede de drenagem em formato vetorial e, das mini bacias, por meio da ferramenta *Adjoint Catchment Processing*.

Por fim, os arquivos que foram gerados em formato vetorial, tiveram de ser convertidos para o formato *raster*, em função do programa a ser utilizado posteriormente aceitar apenas este modelo e, com isso, o resultado final deste procedimento foi a obtenção dos mapas de direções de fluxo, rede de drenagem e mini bacias, além do modelo digital de elevação da mesma, tendo em todos estes

arquivos sua área delimitada apenas para a região de interesse, como elucidado na figura 9.

**Figura 9** – Discretização da bacia hidrográfica: (1) MDE, (2) Direções de fluxo, (3) Rede de drenagem, (4) Mini bacias.



Fonte: Do autor, (2019).

### 3.4 PREPARO DOS DADOS GERADOS PELO *ARC HYDRO TOOLS*

Ao término da etapa anterior, os dados que foram gerados tiveram que ser retrabalhados de modo que estes pudessem ser utilizados no PrePro-SIAQUA-IPH, que é um *plugin* de pré-processamento dos dados que precisavam ser inseridos no SIAQUA-IPH, para que as simulações pudessem ser realizadas e, fossem

gerados mapas de propagação dos poluentes lançados ao longo do corpo hídrico e, suas respectivas concentrações ao longo do tempo e espaço, de acordo com as informações disponibilizadas por Fleischmann, Fan e Collischonn (2013).

Mas, antes dos dados serem inseridos neste *plugin*, os quatro arquivos gerados na etapa anterior tiveram que ser convertidos para o formato ASCII, através do *ArcGIS*.

Posteriormente, as informações foram carregadas no programa e, foi definido o cálculo das distâncias dos pixels com a configuração padrão e, foi estipulada uma declividade mínima para a bacia de 0,01 m/Km, de modo que fosse evitada a geração de trechos com valores negativos de declividade.

Com a execução do PrePro-SIAQUA-IPH, foi gerada uma pasta com uma série de dados no formato .txt para a inserção no SIAQUA-IPH, sendo o principal deles, aquele que carregava as características geométricas da bacia de drenagem.

### 3.5 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES DA BACIA HIDROGRÁFICA

Baseando-se em dados de postos fluviométricos, é possível calcular a vazão em cada trecho da bacia hidrográfica, sendo para tanto, utilizados os dados geométricos da bacia, que foram obtidos através do PrePro-SIAQUA-IPH e, as informações obtidas através do portal HidroWeb, que é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Através do HidroWeb, foram pegos os dados do posto 84820000, que são informados no quadro 4 e, carregados no programa para que ele pudesse realizar os cálculos necessários, sendo criado por fim, um arquivo com as vazões de referência.

Ressalta-se que, as principais informações para realização deste procedimento, oriundas do posto fluviométrico em questão, além dos dados monitorados de vazão, são a sua localização e sua respectiva área de drenagem.

**Quadro 4** - Dados da estação fluviométrica utilizada para regionalização de vazões da bacia hidrográfica delimitada.

IDENTIFICAÇÃO	
<b>Código</b>	84820000
<b>Nome da estação fluviométrica</b>	Forquilha

(continua)

(continuação)

<b>BACIA HIDROGRÁFICA</b>	
<b>Bacia</b>	8 – Atlântico, trecho sudeste
<b>Sub Bacia</b>	84 – Rios Tubarão, Araranguá ...
<b>Rio</b>	Rio Mãe Luzia
<b>DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO</b>	
<b>Estado</b>	Santa Catarina
<b>Município</b>	Forquilha
<b>Responsável</b>	ANA
<b>Latitude</b>	S 28° 44' 57.12"
<b>Longitude</b>	W 49° 28' 27.84"
<b>Altitude (m)</b>	40
<b>Área de drenagem (Km<sup>2</sup>)</b>	526

Fonte: BRASIL, (2009).

### 3.6 SIMULAÇÃO DO LANÇAMENTO DE POLUENTES DENTRO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Após os procedimentos descritos anteriormente, as operações se voltaram para o SIAQUA-IPH, em que, utilizando-se a ferramenta de inserção de dados da bacia, foi selecionado o arquivo de geometria, criado anteriormente, as informações das vazões de cada trecho e, foram importados os limites máximos permissíveis das concentrações das substâncias simuladas de acordo com a Legislação vigente no Brasil, como explicitado no quadro 5.

**Quadro 5** - Padrões para corpos de água de acordo com sua classe.

<b>Tipo</b>	<b>Classe</b>	<b>Ferro dissolvido (mg/L)</b>	<b>Manganês total (mg/L)</b>
<b>Águas doces</b>	Classe 1	0,3	0,1
	Classe 2	0,3	0,1
	Classe 3	5,0	0,5

Fonte: BRASIL, (2005).

As informações quanto ao tempo de lançamento e quantidade dos mesmos, também foram inseridas. Neste momento, para que fosse possível realizar uma série de simulações com dados que pudessem ser correlacionados com outras informações já estudadas na área, foram selecionadas todas as bocas de mina que,

até o final do ano de 2016, ainda não haviam passado por nenhum processo de recuperação ambiental, continuando a contribuir com drenagem ácida para a bacia hidrográfica.

As informações destes lançamentos foram obtidas nos apêndices do 11º Relatório de Monitoramento do Grupo Técnico de Assessoramento (GTA) da Ação Civil Pública nº 93.80000.533-4, os quais objetivam documentar todo desenvolvimento dos indicadores ambientais de qualidade de áreas que foram afetadas pela extração de carvão na região da Associação dos Municípios da Região Carbonífera (AMREC) (GTA, 2017). Os dados utilizados são explicitados no quadro 6.

**Quadro 6** - Lançamentos de drenagem ácida na bacia hidrográfica delimitada.

Código	Bacia Hidrográfica	Coordenadas (UTM)		Concentrações (mg/L)		Vazão (L/s)
		X	Y	Ferro	Manganês	
BM0001	Araranguá	660784	6828144	0,482	1,39	28,00
BM0078	Araranguá	658370	6831956	312,00	17,20	14,40
BM0087	Araranguá	658399	6831403	4,00	2,47	4,80
BM0102	Araranguá	657584	6830830	24,70	3,00	1,20
BM0111	Araranguá	658201	6830864	12,10	3,55	4,05
BM0116	Araranguá	658355	6830787	128,00	4,54	21,00
BM0139	Araranguá	659340	6827786	3,20	0,42	12,50
BM0166	Araranguá	658669	6829011	1,24	0,298	0,75
BM0169	Araranguá	658258	6832153	18,90	1,37	4,80
BM0174	Araranguá	658135	6832308	44,30	2,07	4,90
BM0202	Araranguá	656949	6833240	42,30	6,82	22,50
BM0338	Araranguá	652862	6827967	98,60	3,63	123,50
BM0388	Araranguá	660700	6823550	3,43	0,627	1,05
BM0642	Araranguá	649745	6839420	24,90	2,14	17,95
BM0738	Araranguá	654895	6823616	42,00	2,02	0,10
BM0768	Araranguá	656605	6821016	104,00	3,61	34,38

Fonte: Adaptado de GTA, (2017).

Como os referidos lançamentos são constantes, tendo apenas alguma variação em sua vazão, não podendo ser definida a data em que se iniciaram e nem a que cessarão, foi considerado, para nível de simulação, que estes são permanentes.

Ademais, também se definiu um tempo para cálculo de 24 horas, bem como se realizaram testes em três situações distintas dentro da bacia de drenagem, quais sejam: épocas de secas, de cheias e, de vazões intermediárias, de modo que fosse possível analisar a diferença das concentrações e propagações nestas situações distintas.

Ainda, foi necessário definir o coeficiente de decaimento cinético de cada substância analisada por meio de pesquisa bibliográfica, como demonstrado no quadro 7.

**Quadro 7** - Constantes de decaimento cinético utilizadas.

Substância	Coeficiente (dia <sup>-1</sup> )	Observação	Fonte
Ferro (II)	$2,400 \times 10^{-5}$	Em ambientes com pH em torno de 3,5	MORGAN, (2005)
Manganês (II)	$1,608 \times 10^{-3}$	Em ambientes com pH neutro	HARVEY, (2019)

Entretanto, ressalta-se que para obter o resultado simulado ainda mais calibrado, faz-se necessária a realização de análises laboratoriais, as quais são capazes de definir quais constantes seriam ideais. Com a realização destas análises, seria possível reajustar os coeficientes sempre que a substância atingisse trechos de drenagem com características significativamente distintas, todavia, em estudos que não necessitam de grande acurácia, valores encontrados na literatura já são suficientes.

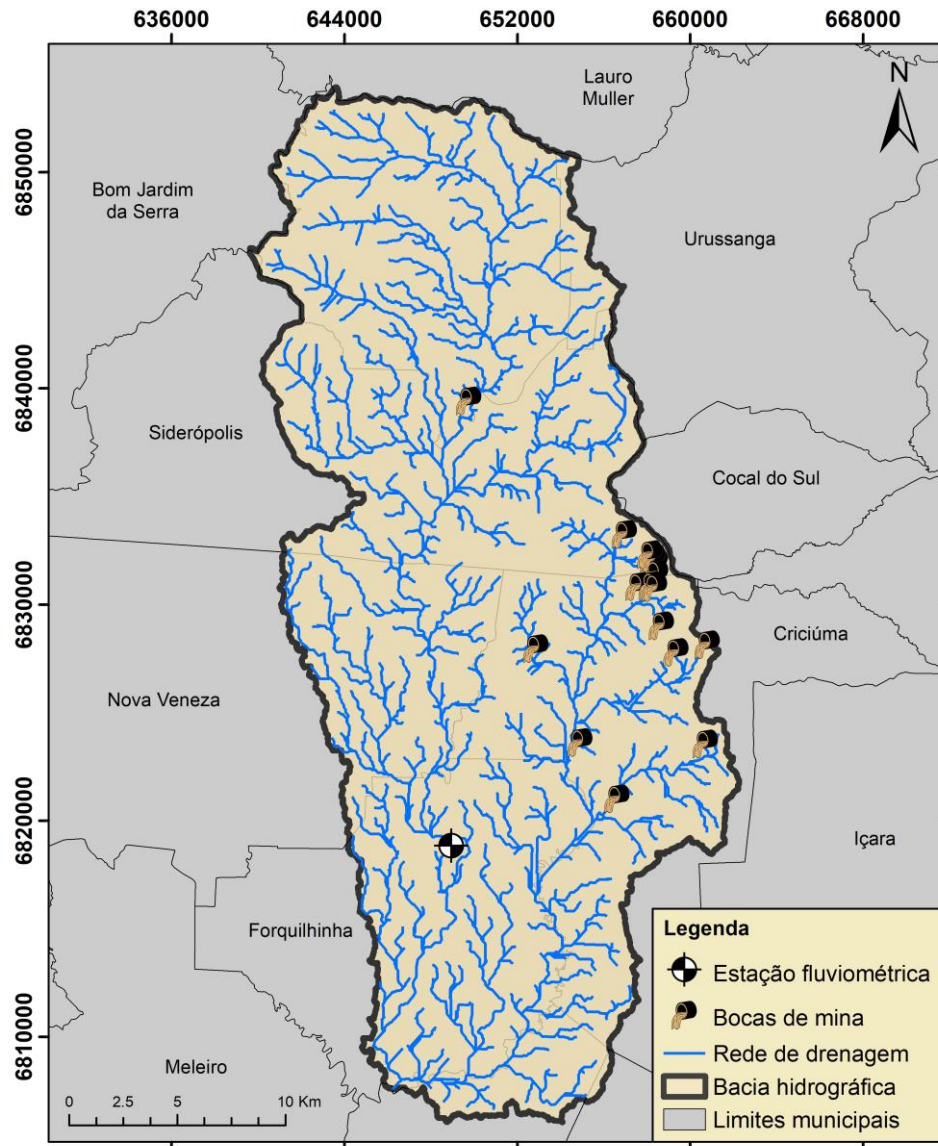
Por fim, foram adicionados os dados referentes ao despejo dos poluentes no corpo hídrico, que poderiam ser de três tipos: esgoto, efluente com alta concentração de matéria orgânica e/ou, efluente com poluente específico, tendo sido esta última opção a escolhida para os testes aqui abordados.

Neste momento, foram inseridos os dados de cada poluente que se desejou analisar de maneira individualizada, como demonstrado na figura 10, que consta com os pontos de localização de cada boca de mina abandonada e que se encontram em estágio de monitoramento, sem terem sido realizadas obras de recuperação ambiental nas mesmas.

Os resultados destas simulações foram arquivos de texto com os valores calculados das concentrações das substâncias analisadas em diferentes situações dentro do corpo hídrico, sendo estas, condições de baixa, média e alta vazão nos

trechos dos rios delimitados, que puderam ser utilizadas para geração de mapeamentos com a concentração em cada parte do corpo hídrico, além de uma série de gráficos e polutogramas.

**Figura 10** - Localização dos pontos de lançamento de efluente.



Fonte: Do autor, (2019).

### 3.7 DADOS GERADOS

Por fim, foi realizada uma análise dos valores encontrados com o estabelecido na Legislação, que se sucedeu com uma discussão sobre a confiabilidade dos dados obtidos através dos mapeamentos apresentados, tomando como base outros estudos que se assemelham com o que foi desenvolvido.

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

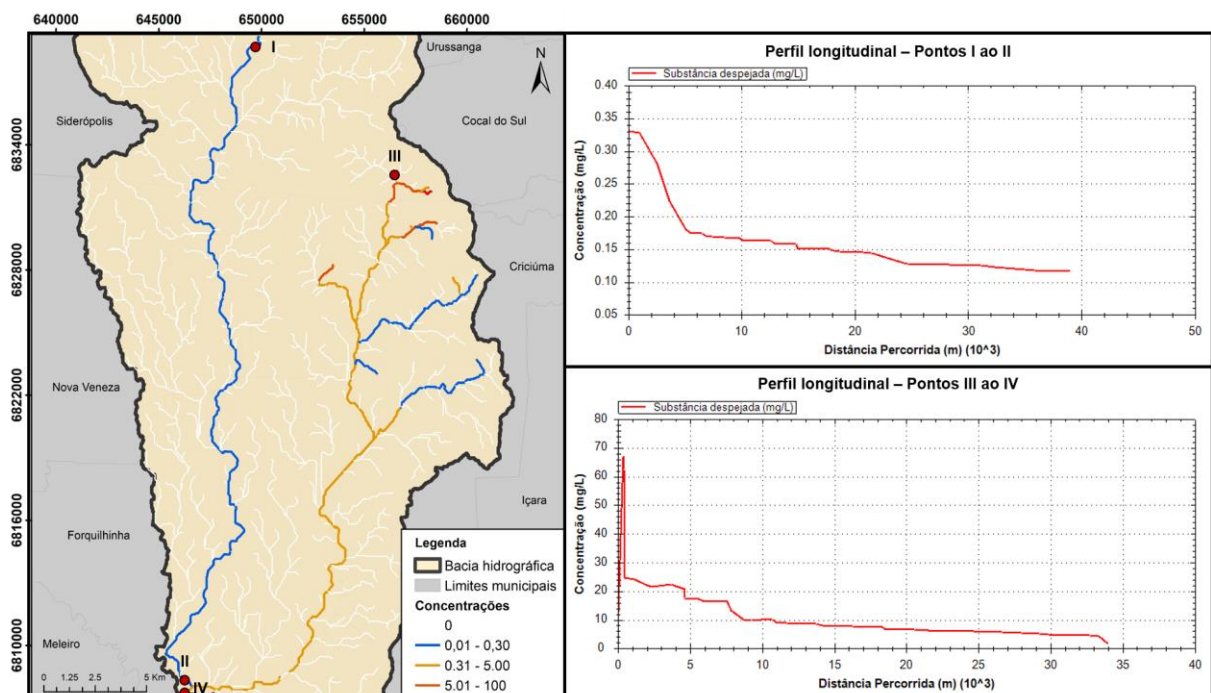
A análise dos dados gerados se sucedeu com um comparativo dos três cenários simulados para cada substância abordada, com ênfase para os perfis longitudinais da concentração máxima calculada nos trechos principais da bacia de drenagem, que recebem cargas ácidas das bocas de mina e, a um comparativo direto entre a influência desta contribuição isolada em relação ao valor máximo permitido para rios de classe 2, segundo a Resolução CONAMA nº 357/05.

Destaca-se que as observações puderam ser divididas em dois percursos principais, onde aquele que se localiza entre os pontos I e II, representam parte da drenagem do Rio Mãe Luzia, enquanto que, o trecho representado entre os pontos III e IV, fazem indicação ao Rio Sangão.

### 6.1 DISPERSÃO DO FERRO DISSOLVIDO NO CORPO HÍDRICO

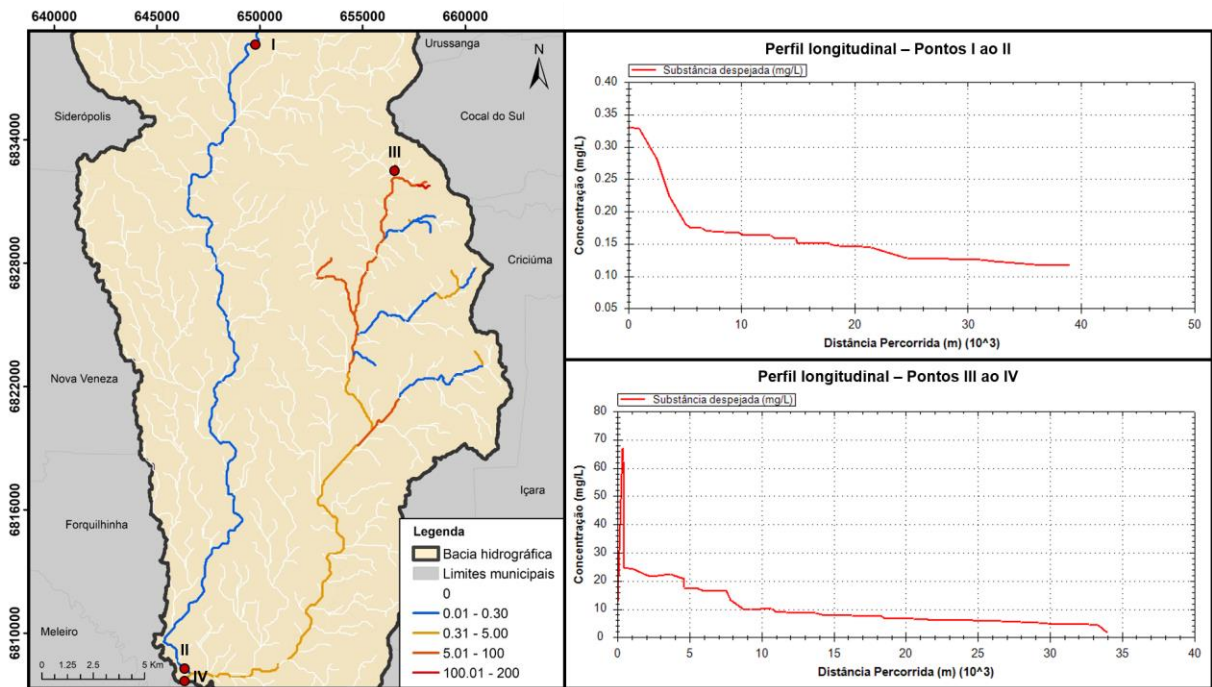
Nas primeiras simulações, foram inseridos os dados referentes as análises de dispersão do ferro dissolvido no corpo hídrico, como pode ser observado nas figuras 11, 12 e 13.

**Figura 11** - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de altas vazões.



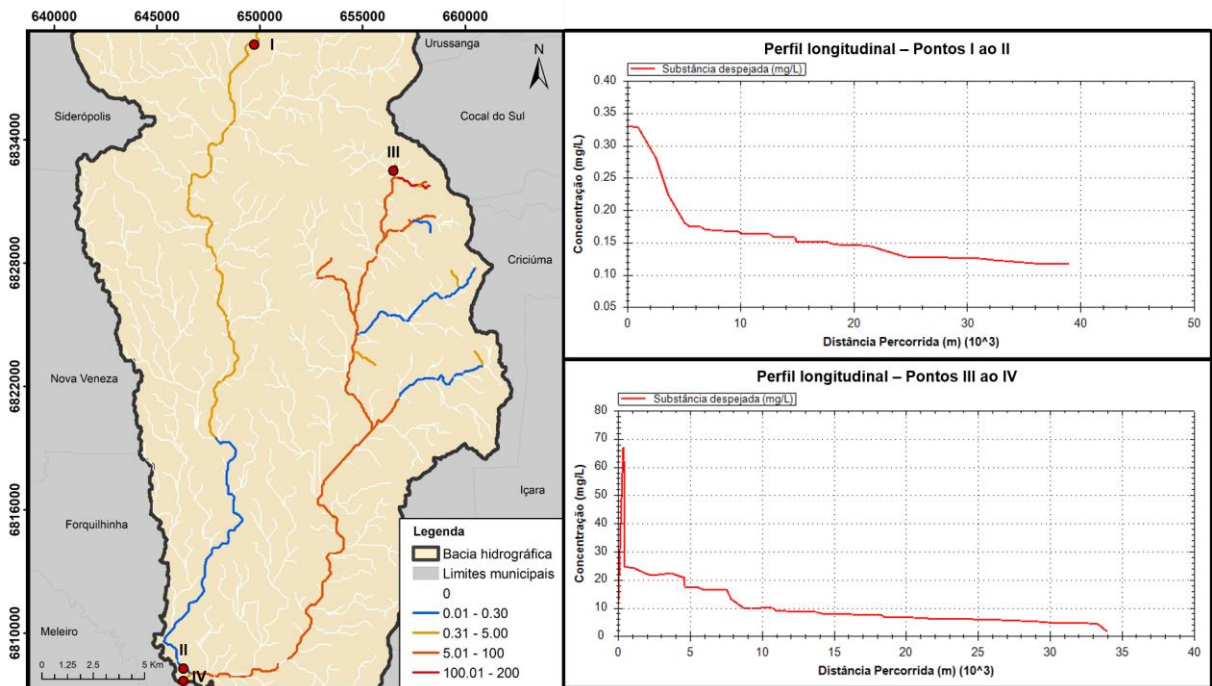
Fonte: Do autor, (2019).

**Figura 12** - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de médias vazões.



Fonte: Do autor, (2019).

**Figura 13** - Concentrações máximas atingidas de ferro dissolvido em período de baixas vazões.



Fonte: Do autor, (2019).

Em uma primeira análise, percebe-se facilmente a correlação existente entre a diluição da substância que está sendo despejada no curso hídrico com os valores de vazão calculados para os trechos dos rios em diferentes períodos do ano, pois a concentração de ferro dissolvido tende a ser mais significativa em períodos secos.

Neste momento, torna-se importante frisar que, as simulações correspondem apenas ao cenário proposto ao *software*, refletindo uma série de lançamentos isolados de interferências externas, como o carreamento do solo e a erosão das margens do rio que tendem a ocorrer mais intensamente em períodos chuvosos e que, refletem diretamente no aumento da concentração do ferro nas águas superficiais (MENEZES *et al*, 2009).

A opção em realizar um estudo não considerando demais interferências, se deu em função da bacia delimitada ser de tamanho razoável e de se buscar identificar o real impacto das drenagens ácidas oriundas de passivos ambientais que continuam trazendo consequências de maneira constante para a região.

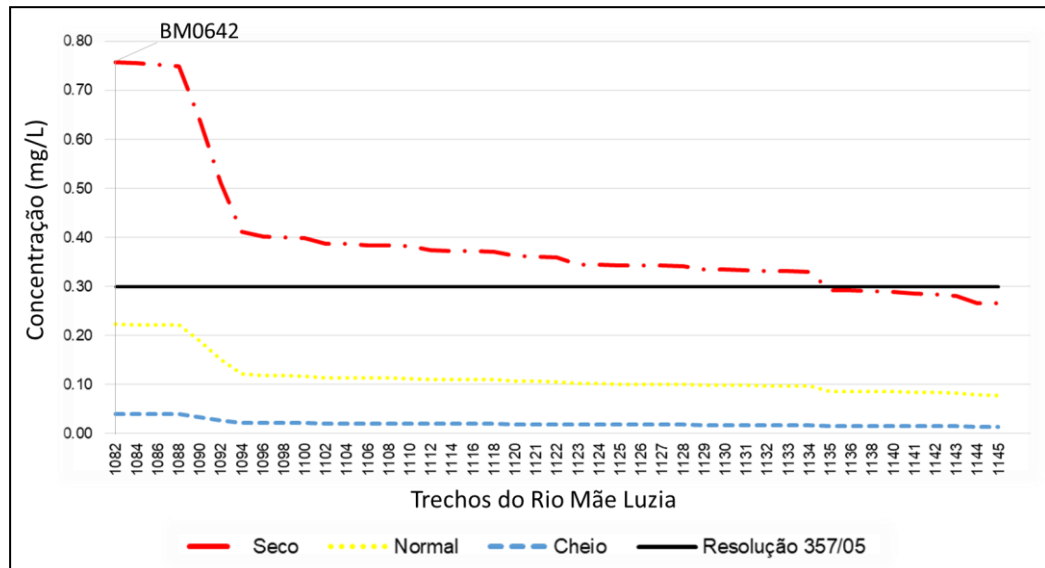
Todavia, quando se deseja analisar o impacto proveniente de diferentes fontes de poluição em bacias hidrográficas com áreas bastante relevantes, pode-se aplicar adicionalmente à simulação um modelo hidrológico que considere os demais fatores que interferem no escoamento da água para o interior dos trechos de drenagem estudados, analisando assim, os tipos de solos e a sua cobertura, além de outros parâmetros que afetem diretamente nestes escoamentos (FAN, 2013).

Ademais, é válido observar o comportamento dos perfis longitudinais encontrados ao longo dos estudos, pois estes demonstram o comportamento do ferro dissolvido a cada metro percorrido pela substância.

Esta análise acaba sendo influenciada diretamente pelo tipo de lançamento ocorrido (instantâneo, intermitente, contínuo ou permanente), pelas vazões dos trechos dos rios, pelo número de lançamentos no percurso e, pelo coeficiente de decaimento da substância utilizado como base de cálculo, sendo que, o adequado para se atingir um resultado com maior precisão é se ajustar o valor desta constante sempre que a simulação atinja um ambiente com características que se diferem significativamente das anteriores, pois, por exemplo, alguns pontos deste corpo hídrico apresentam uma carga de acidez maior em relação ao restante de sua extensão, fator que faz com que o decaimento da substância seja alterado.

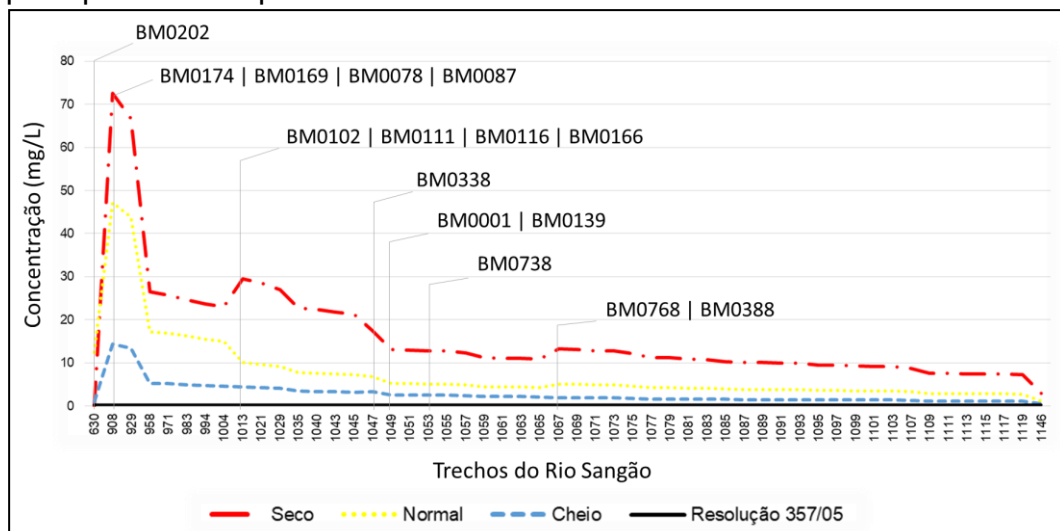
Entretanto, salvo os adendos destacados, as simulações realizadas com o *software* SIAQUA-IPH, trouxeram resultados muito coerentes com o que se esperava para os rios em análise, pois devido à maior densidade de drenagens ocorrerem nas regiões com cotas mais altas dos rios, conseqüentemente são nestes locais que os picos de concentração de ferro dissolvido se apresentam. O referido comportamento pode ser observado comparativamente entre os cenários considerados no gráfico 1, que trata do Rio Mãe Luzia e, no gráfico 2, que elucida o Rio Sangão.

**Gráfico 1** - Picos de concentração de ferro em cada trecho da drenagem principal entre os pontos I e II.



Fonte: Do autor, (2019).

**Gráfico 2** - Picos de concentração de ferro em cada trecho da drenagem principal entre os pontos III e IV.



Fonte: Do autor, (2019).

Observando estes gráficos, que indicam o desenvolvimento da concentração da substância em partes fragmentadas do rio, percebe-se que, no primeiro caso, que existe apenas a contribuição de uma boca de mina abandonada, a contribuição com ferro dissolvido não acarreta em uma alteração significativa de sua concentração após poucos quilômetros de distância do local de lançamento, ficando tal valor, abaixo do VMP na Resolução CONAMA nº 357/05 durante a maior parte do ano, tendo este limite ultrapassado apenas em períodos de baixas vazões do rio.

Todavia, quando as observações são voltados para o trecho correspondente do Rio Sangão, exemplificado no gráfico 2, faz-se notar que, devido à presença de diversas bocas de mina abandonadas que apresentam drenagem ácida, sendo algumas com concentração e vazão bastante relevantes, a contribuição com ferro dissolvido faz com que o VMP seja ultrapassado durante todo o percurso da rede de drenagem e, nos três cenários simulados.

Estas simulações são capazes de evidenciar de maneira bastante clara, um motivo pelo qual a recuperação dos referidos corpos hídricos se torna tão difícil, pois existem contribuições intensas de passivos ambientais no alto de seus cursos e que, possuem alto potencial degradador associado (FERNÁNDEZ; ACCIOLI, 1983).

Não obstante, é importante frisar que os gráficos 1 e 2 apresentam comportamentos distintos do observado nos perfis longitudinais destacados ao lado de cada mapeamento gerado, pois estes demonstram o desenvolvimento da concentração do poluente em cada segmento do rio, não fazendo uma referência diretamente proporcional à distância percorrida pela substância, como ocorre nos perfis supracitados e, os valores que se apresentam na linha dos trechos do rio, fazem referência apenas à nomenclatura adotada para cada um destes segmentos durante os trabalhos de simulação.

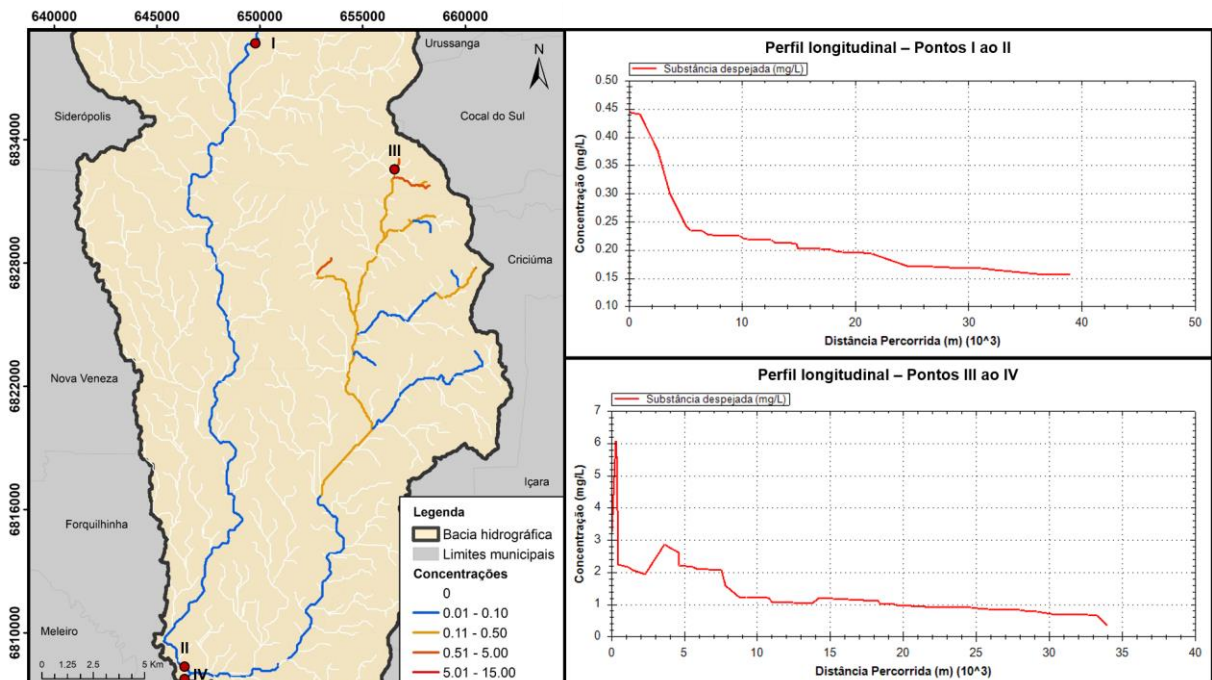
## 6.2 DISPERSÃO DO MANGANÊS TOTAL NO CORPO HÍDRICO

Outro parâmetro bastante relevante quando se avalia drenagens ácidas, é a concentração de manganês (Mn), que não raramente se apresenta acima do indicado pela legislação nos recursos hídricos da região que se encontram impactados (ALEXANDRE, 1999), a qual também é bastante acentuada nos lançamentos analisados.

Todavia, ressalta-se que o decaimento desta substância nas simulações que seguem, será um pouco menor do que se supõem que seja a constante real aplicada nos recursos hídricos em análise, pois o valor de decaimento cinético encontrado na literatura, refere-se a uma condição de ambiente neutro para básico, o que é um pouco diferente da realidade, que mais se aproxima de uma condição ácida, em decorrência de diversas contribuições de passivos ambientais que se apresentam na região que adentra à bacia delimitada. Desta maneira, teoricamente haveria uma maior dificuldade da concentração do manganês ser reduzida em relação ao que foi calculado.

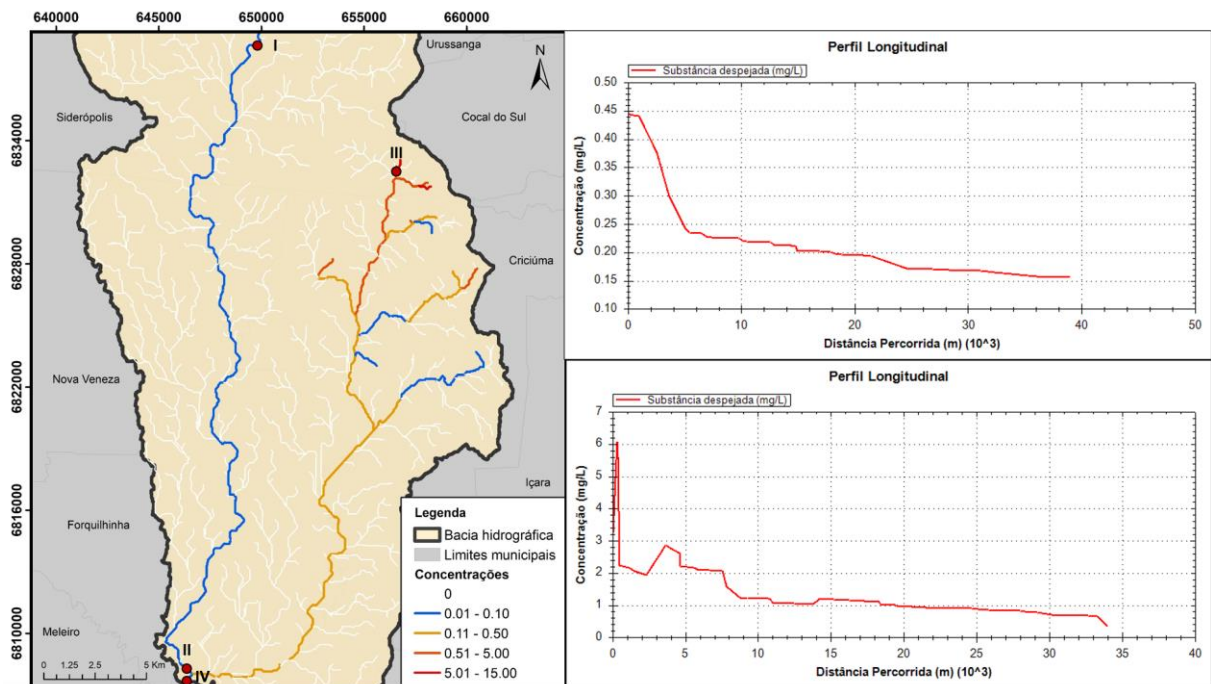
Mas, com as devidas ressalvas, os resultados das simulações referentes as concentrações de manganês total nos corpos hídricos são demonstradas nas figuras 14, 15 e 16 e, assim como no caso anterior, considerando-se a equação da continuidade para prever a concentração do poluente no corpo hídrico, pode-se perceber que o impacto do poluente será menor, quanto maior for a vazão da bacia de drenagem (VESILIND; MORGAN; HEINE, 2018)

**Figura 14** - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de altas vazões.



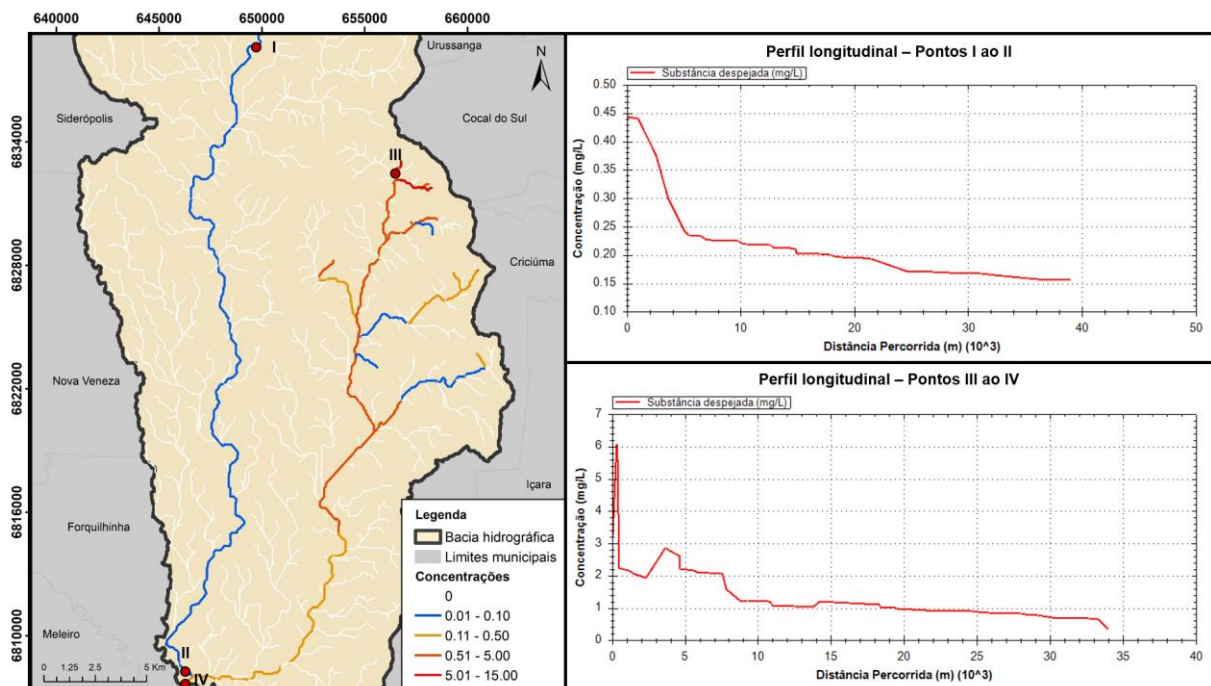
Fonte: Do autor, (2019).

**Figura 15** - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de médias vazões.



Fonte: Do autor, (2019).

**Figura 16** - Concentrações máximas atingidas de manganês total em período de baixas vazões.



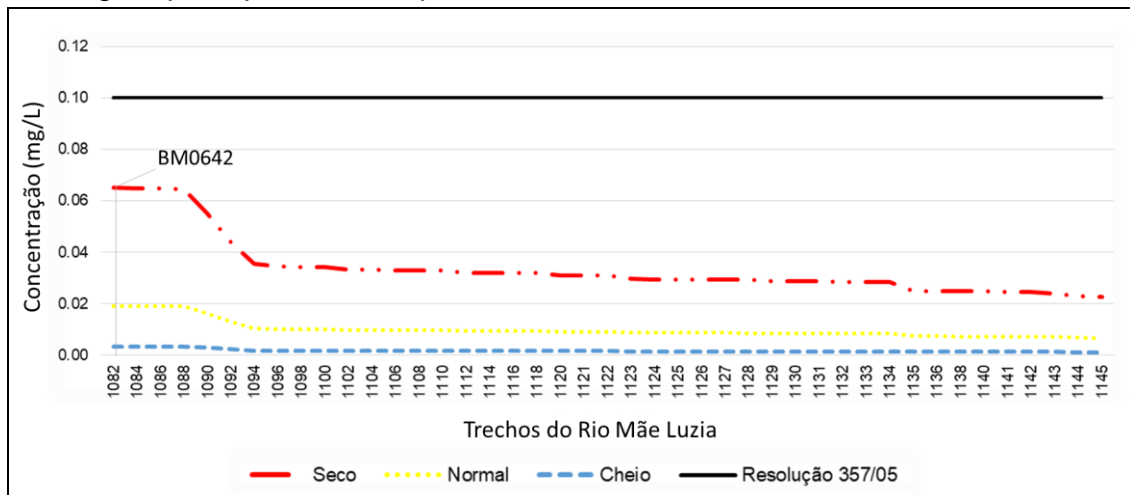
Fonte: Do autor, (2019).

A partir dos perfis longitudinais, pode-se perceber a diferença que existe entre os resultados destas simulações com aqueles obtidos com os valores de ferro

dissolvido, pois neste caso, a reta de decaimento denota para valores um pouco mais constantes do que as anteriores.

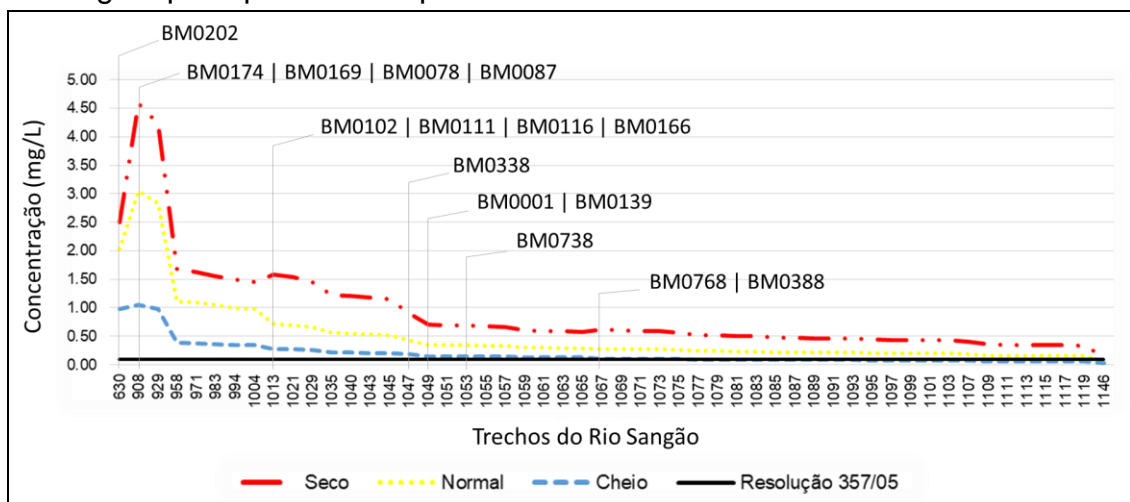
Não obstante, a seguir seguem exemplificados o comportamento desta substância ao longo de cada trecho dos corpos hídricos analisados, sendo que, no gráfico 3, existe uma representação da concentração de manganês total ao longo do Rio Mãe Luzia enquanto que, no gráfico 4, há uma elucidação do comportamento da substância ao longo do Rio Sangão, sendo todos estes comparados com os diferentes cenários simulados e com o estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/05.

**Gráfico 3** - Picos de concentração de manganês em cada trecho da drenagem principal entre os pontos I e II.



Fonte: Do autor, (2019).

**Gráfico 4** - Picos de concentração de manganês em cada trecho da drenagem principal entre os pontos III e IV.



Fonte: Do autor, (2019).

Assim como observado nas primeiras simulações, para o caso da dispersão do manganês total nos cursos hídricos, este acabou se apresentando abaixo do indicado pela resolução CONAMA nº 357/05 para o gráfico 3, muito em função deste receber influência de uma boca de mina isolada ao longo de sua extensão.

Todavia, quando analisado o gráfico 4, que faz menção ao Rio Sangão, que recebe a contribuição de DAM por meio de diversas bocas de mina, este se apresentou com valores superiores ao VMP pela Legislação, sendo este fator amenizado nos períodos de cheia do rio, o que incita em maior diluição da substância em questão.

### 6.3 COMPORTAMENTO DAS SUBSTÂNCIAS SIMULADAS

Nas simulações realizadas, o *software* considerou, para cada um dos lançamentos inseridos, que as dispersões transversais mais significativas ocorrem logo após o efluente ser inserido no corpo hídrico, que são as regiões nas quais ainda não há mistura completa das substâncias, que é condizente com as altas concentrações dos poluentes nos sedimentos das áreas que recebem contato direto com os despejos.

Não obstante, as severas reduções das concentrações dos poluentes em alguns trechos dos rios destacados se devem, primordialmente, a estes se encontrarem logo após outros trechos que possuem vazões relevantes em decorrência de suas áreas de drenagens calculadas e que, não tiveram suas águas impactadas por estes lançamentos. Desta forma, ocorre um diluição mais significativa e, as concentrações tendem a apresentar um comportamento de decréscimo mais evidente, como previsto por Vesilind; Morgan e Heine (2018).

É importante ressaltar ainda que, como a vazão dos lançamentos é afetada diretamente por fatores naturais, no momento em que o cenário de simulação se modifica, ou seja, quando se altera a vazão da calha do rio para que esta se adeque a diferentes períodos do ano, existe uma tendência para que as vazões inseridas no meio também se modifiquem ao longo do tempo, fator que influiria diretamente nos resultados dos demais cenários.

Todavia, o valor da vazão dos lançamentos para este trabalho, não foi alterado para as diferentes perspectivas analisadas, tendo sido adotada uma

situação de monitoramento que apresentou valores intermediários em relação as demais observações realizadas em cada área, já que seria difícil prever a correta adequação dos valores de lançamento, continuando existindo variações em seus resultados e, prejudicando a avaliação destes lançamentos específicos frente à características físicas distintas das bacias hidrográficas delimitadas.

#### 6.4 AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES FRENTE À REAL SITUAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DA AMREC

Uma maneira eficiente de analisar os resultados obtidos com estes modelos de simulações, é a realização de comparativos com constatações oriundas de trabalhos de campo e, partindo deste pressuposto, atualmente, o Rio Sangão e alguns de seus afluentes, são aqueles recursos hídricos que podem ser enquadrados com os piores resultados frente à análises físico-químicas de qualidade de suas águas dentro da AMREC (GTA, 2017), o que muito reafirma os resultados encontrados, uma vez que são as drenagens oriundas destas bocas de minas abandonadas que contribuem significativamente com a sua degradação.

Este cenário já era discutido por Fernández e Accioli (1983), que argumentavam que a degradação dos recursos hídricos da região carbonífera de Santa Catarina era intensificada em função de minas desativadas que, continuavam contribuindo com drenagens ácidas para alguns cursos hídricos.

Todavia, os valores monitorados em campo nestas drenagens superficiais tendem a ser superiores aos simulados, em decorrência de outras contribuições para os mesmos, como é o caso de áreas com rejeito sulfetado proveniente do beneficiamento do carvão que ainda não foram recuperadas ao longo dos últimos anos.

E ainda, o Rio Mãe Luzia que recebe contribuição de apenas uma boca de mina, acabou apresentando condições de qualidade razoáveis em comparação com o Rio Sangão, o que também é reafirmado ao longo dos relatórios do GTA. Mas, também é evidente que estes recursos hídricos recebem contribuições de outras áreas que foram previamente afetadas pela mineração do carvão, justificando valores reais superiores aos simulados.

Não obstante, é importante ressaltar que todas as simulações foram realizadas partindo da delimitação da rede hidrográfica a partir de modelos digitais

de elevação, os quais são muito utilizados para estudos de grandes áreas, porém, eles carregam consigo algumas imprecisões quanto à realidade, influenciando, desta maneira, para que os traçados dos corpos hídricos não sejam totalmente verazes com o observado em campo.

Contudo, quanto a este fator, uma alternativa para que o resultado dos mapeamentos tenha maior acurácia, é a realização do traçado das drenagens de forma manual, o que pode ser viável para análises de pequenas ou médias bacias, porém, para estudos em grandes bacias, o trabalho envolvido tende a ser elevado de um modo muito significativo, e um pouco inviabilizado.

Outro ponto relevante quando se analisa o comportamento da dispersão de poluentes metálicos em corpos hídricos, é a qualidade físico-química dos sedimentos das áreas afetadas, o que não se pode fazer a partir deste modelo, pois o mesmo utiliza uma simplificação em seus cálculos de dispersão que acabam por impossibilitar que sejam identificadas as regiões, distantes dos pontos de lançamento, que tendem a acumular os referidos poluentes nos sedimentos.

## 7 CONCLUSÃO

Com o crescente desenvolvimento da sociedade e o aumento da demanda por recursos para que as necessidades coletivas e individuais sejam atendidas, percebe-se um aumento significativo de atividades que inerentemente são detentoras de potenciais impactos ambientais.

Neste contexto, o controle da degradação ambiental se faz fundamental para que seja assegurado um ambiente ecologicamente equilibrado, como disposto art. 225 da Constituição Federal e, as tecnologias que potencializam o controle ambiental, especialmente em áreas que já vem sofrendo amplos impactos, detém fundamental importância no auxílio à remediação da degradação.

Assim, percebe-se que os sistemas de gestão ambiental que integram SIG's, conseguem trazer resultados mais efetivos quando se deseja identificar pontos críticos de poluição ou de suscetibilidade à danos ambientais, por exemplo.

Na região sul de Santa Catarina, aonde uma expressiva parcela dos recursos hídricos se encontram severamente comprometidos, muito em função de atividades minerárias que se desenvolveram em período em que a legislação ambiental era inexistente ou pouco efetiva, a utilização de *softwares* que permitam um controle integrado e de simples interpretação de parâmetros relevantes se faz essencial para o adequado controle da situação destes ambientes frente aos trabalhos que vem sendo desenvolvidos.

Neste sentido, os estudos que se apresentaram ao longo deste trabalho demonstraram o potencial interpretativo que a utilização de um *software* que permite a espacialização de dados coletados em campo, ao longo dos últimos anos, possibilita àqueles que gerem ou que acompanham as atividades desenvolvidas na região.

Com as simulações realizadas, pode-se concluir que os rios que recebem contribuições de bocas de mina abandonadas e que, ainda possuem escoamento de DAM, tem muito de seus trabalhos de recuperação dificultados, uma vez que relevante parte desta contribuição se localiza na região alta de seu curso e, aliado a uma baixa taxa de decaimento das substâncias que são inseridas no meio, a dispersão destes poluentes tende a ocorrer por uma longa distância, impactando os locais banhados pelo recurso hídrico.

Com isso, percebe-se que o Rio Sangão possui uma contribuição muito elevada de DAM oriunda de diversas bocas de mina abandonadas e, quando se analisa apenas esta contribuição isolada, já se pode perceber que ele tem os parâmetros ferro e manganês com concentrações muito distantes do que é estipulado pela Resolução CONAMA nº 357/05 para rios de classe 2 e, o Rio Mãe Luzia, que recebe contribuição de apenas uma destas fontes, tem sua concentração fora do limite apenas em períodos de baixa vazão e em relação à concentração de ferro.

No entanto, estes valores ainda são muito alterados no curso hídrico em função de existirem diversas outras contribuições que acabam por afetar a qualidade de suas águas que não foram consideradas, pois o objetivo foi analisar isoladamente a contribuição destas fontes perante os referidos recursos hídricos.

Desta maneira, diante do alto índice de comprometimento das águas naturais da região da AMREC, a metodologia que se desenvolveu neste trabalho pode ser analisada como um exemplo a ser aplicado para o monitoramento de todas as bacias hidrográficas afetadas, pois ela permite que as análises sejam feitas em regiões com grandes extensões, devendo apenas se ter o cuidado para a correta calibração do modelo em função das características locais, de modo que os resultados obtidos com o *software* sejam o mais próximo possível daqueles constatados em trabalhos de campo.

Segundo Fan (2013), quando o modelo é aplicado com a ausência de detalhe dos dados necessários, os erros envolvidos podem se passar por uma maior dispersão do poluente decorrente de um ligeiro atraso para o alcance da concentração de pico no trecho, o que pode ser remediado a partir de uma calibração manual, na qual os resultados tendem a ser muito semelhantes com aqueles que se obtém com trabalhos de campo, chegando a atingir resultados que podem nortear decisões quanto à utilização da água do corpo hídrico estudado de maneira bastante segura.

Ademais, a metodologia aplicada ainda permite que estudos sobre fontes específicas de contaminação em bacias hidrográficas sejam desenvolvidos, como foi o caso deste trabalho, no qual se pode avaliar o impacto negativo frente a estes recursos em função da contribuição ácida das bocas de mina que ainda não foram recuperadas.

Todavia, é possível ainda aplicar este procedimento inclusive para trabalhos periciais nos quais existam uma riqueza maior de informações que permitam calibrar o modelo com mais precisão, o que possibilita que seja analisada a contribuição de todas as significativas fontes de poluição dentro de uma bacia de drenagem, por exemplo, e comparar os resultados obtidos nas simulações com aqueles adquiridos em análises de campo, possibilitando que sejam analisadas possíveis fontes de contaminantes das quais não se tem conhecimento e que, estejam contribuindo de maneira relevante para a degradação dos recursos hídricos estudados.

## REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, Nadja Zim. **Diagnóstico ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina:** degradação dos recursos naturais. *Tecnologia e Ambiente*, Criciúma, v. 5, n. 2, p.35-50, dez. 1999.

ALVES, Renato Igor da Silva et al. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. **Revista Ambiente & Água**, [s.l.], v. 5, n. 3, p.122-132, 9 dez. 2010. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). <http://dx.doi.org/10.4136/1980-993x>.

ASSAD, Eduardo Delgado; SANO, Edson Eyji (Ed.). **Sistema de Informações Geográficas:** Aplicações na Agricultura. 2. ed. Brasília: Embrapa, 1998. 434 p.

BATTALHA, Bem-Hur Luttembarck; PARLATORE, Antônio Carlos. **Controle da qualidade da água para consumo humano:** Bases conceituais e operacionais. São Paulo: Cetesb, 1977. 198 p.

BITTENCOURT, Cláudia; PAULA, Maria Aparecida Silva de. **Tratamento de água e efluentes:** Fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos. São Paulo: Erica, 2014. 185 p.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução à engenharia ambiental:** O desafio do desenvolvimento sustentável. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005. 318 p.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Inventário das estações fluviométricas**. 2. ed. Brasília: SGH, 2009. 196 p.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Banco de dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 15 set. 2019.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm)>. Acesso em: 19 ago. 2019.

BRASIL. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 2014. 112 p.

BRASIL. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p.

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 out. 2017. Seção 1. Disponível em: <<http://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da>>

atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/portarias/portaria-de-consolidacao-no-5-de-28-de-setembro-de-2017-1/view>. Acesso em: 09 set. 2019.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 maio 2011. Seção 1, p. 89. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 10 out. 2019.

CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (Org.). **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologias e Gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 789 p.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: Inpe, 2001. 345 p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

CÂMARA, Gilberto; MEDEIROS, José Simeão de (Org.). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 1998. 159 p.

CAPAZ, Rafael Silva; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta (Org.). **Ciências ambientais para Engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 328 p.

CARBONARI, Fernando Lório. **A gestão dos recursos hídricos: Conceitos e princípios fundamentais**. 56 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CITADIN, Paulo Roberto. **Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga, Sul de Santa Catarina: Realidade socioambiental e evolução histórica na formação do arcabouço jurídico hídrico brasileiro**. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2014. Disponível em: <<http://repositorio.unesc.net/handle/1/3796>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

DAVIS, Mackenzie L.; MASTEN, Susan J. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 858 p.

ESRI. **Arc Hydro Tools: Tutorial**. New York: Esri, 2011. 189 p.

FAN, Ricardo Mainardi. **Simulação dos impactos de lançamentos de poluentes sobre a qualidade da água de bacias hidrográficas integrada com Sistema de Informação Geográfica**. 2013. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/78973>>. Acesso em: 10 set. 2019.

FERNÁNDEZ, Miguel Fernández e; ACCIOLI, Affonso Augusto Nargele. **O controle da poluição das águas pela mineração de carvão no estado de Santa Catarina.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 12, 1983, Rio de Janeiro: ABES, 1983. p. 1 - 70.

FERREIRA, Helder Calsavara. **Geoprocessamento aplicado à determinação da fragilidade emergente em um manancial de abastecimento público: a microbacia do alto do rio Sarandi.** 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

FINKLER, Raquel et al. **Fundamentos de Engenharia Ambiental.** Porto Alegre: SAGAH, 2018. 170 p.

FLECK, Leandro; TAVARES, Maria Herminia Ferreira; EYNG, Eduardo. Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: Uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Paraná, v. 1, n. 7, p.47-62, 2013.

FLEISCHMANN, Ayan Santos; FAN, Fernando Mainardi; COLLISCHONN, Walter. **Manual 2.1 de exemplo de preparação de dados de entrada do modelo SIAQUA-IPH: Archydro, PrePro-Siaqua-IPH e regionalização - Aplicado na Bacia do Rio dos Sinos.** Porto Alegre: Ufrgs, 2013. 28 p.

GIORI, Jacqueline Zardo. **Análise dos efeitos de despejos acidentais de poluentes em corpos hídricos usando traçadores fluorescentes - Estudo de caso: Bacia do Rio Guandu / RJ.** 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

GOMES, Jésus de Lisboa; BARBIERI, José Carlos. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. **EBAPE FGV**, São Paulo, v. 2, n. 3, p.1-21, dez. 2004.

GRUPO TÉCNICO DE ASSESSORAMENTO - GTA (Santa Catarina). **11º Relatório de monitoramento dos indicadores ambientais.** Criciúma: SIECESC, 2017. 308 p.

HARVEY, David T. **Thermodynamics, Equilibria, and Kinetics.** Disponível em: <[http://dpuadweb.depauw.edu/harvey\\_web/Chem260/archive260.html](http://dpuadweb.depauw.edu/harvey_web/Chem260/archive260.html)>. Acesso em: 01 out. 2019.

IBRAHIN, Francini Imene Dias. **Introdução ao Geoprocessamento Ambiental.** São Paulo: Érica, 2014. 129 p.

LARENTIS, Dante Gama; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos E. M. Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 3, p.5-22, set. 2008. Disponível em: <10.21168/rbrh.v13n3.p5-22>. Acesso em: 12 set. 2019.

LIMA, Ricardo Neves de Souza et al. Estudo da poluição pontual e difusa na bacia de contribuição do reservatório da usina hidrelétrica de Funil utilizando modelagem espacialmente distribuída em Sistema de Informação Geográfica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.139-150, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41520201600100127676>.

MACK, B.; MCDONALD, Louis M.; SKOUSEN, Jeffrey G. Acidity Decay of Above-Drainage Underground Mines in West Virginia. **Journal Of Environment Quality**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.1043-1050, maio 2010. American Society of Agronomy. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2009.0229>.

MELLER, Guilherme Semprebom et al. **Controle da poluição**. Porto Alegre: Sagah, 2017. 290 p.

MENDONÇA, Sérgio Rolim; MENDONÇA, Luciana Coêlho. **Sistemas sustentáveis de esgotos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2017. 364 p.

MENEZES, Juliana M. et al. Qualidade da água e sua relação espacial com as fontes de contaminação antrópicas e naturais: bacia hidrográfica do rio São Domingos - RJ. **Eng. Agríc.** Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 687-698, 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162009000400019&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162009000400019&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 17 out. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000400019>.

MIHELIC, James R.; ZIMMERMAN, Julie Beth (Org.). **Engenharia Ambiental: Fundamentos, sustentabilidade e projeto**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 695 p.

MIHELIC, James R.; ZIMMERMAN, Julie Beth (Org.). **Engenharia Ambiental: Fundamentos, sustentabilidade e projeto**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 617 p.

MORGAN, James J. Kinetics of reaction between O<sub>2</sub> and Mn(II) species in aqueous solutions. **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, [s.l.], v. 69, n. 1, p.35-48, jan. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2004.06.013>.

RENNÓ, Camilo Daleles; SOARES, João Viane. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental**. São Paulo: Inpe, 2000. 65 p.

SHEKAR, Shashi; XIONG, Hui (Ed.). **Encyclopedia of GIS**. New Jersey: Springer, 2008. p. 633-634.

SILVA, Ana Nobre et al. **Sistemas de Informação Geográfica: Análise Espacial**. Lisboa: DGRM, 2016. 59 p. Disponível em: <[https://www.sophia-mar.pt/pt/recursos\\_pedagogicos/5](https://www.sophia-mar.pt/pt/recursos_pedagogicos/5)>. Acesso em: 12 set. 2019.

SILVEIRA, Geraldo Lopes da; CRUZ, Jussara Cabral (Org.). **Seleção ambiental de barragens: Análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica**. Santa Maria: UFSM, 2005. 390 p.

VESILIND, P. Aarne; MORGAN, Susan M.; HEINE, Lauren G. **Introdução à engenharia ambiental**. 3. ed. São Paulo: Cengage, 2018. 472 p.

WILKEN, Paulo Sampaio. **Engenharia de drenagem superficial**. São Paulo: Cetesb, 1978. 478 p.