

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

SILVIA SARTOR ROSENG

**CARACTERIZAÇÃO DE SEDIMENTOS FLUVIAIS DO RIO
URUSSANGA COMO POTENCIAL INSUMO MINERAL PARA
A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - PPGCEM da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira

Co-orientador: Dr. Alexandre Zaccaron

**CRICIÚMA
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R813c Roseng, Silvia Sartor.

Caracterização de sedimentos fluviais do Rio Urussanga como potencial insumo mineral para a indústria da construção civil / Silvia Sartor Roseng. - 2026.

84 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2026.

Orientação: Fabiano Raupp-Pereira.

Coorientação: Alexandre Zaccaron.

1. Sedimentos fluviais. 2. Urussanga, Rio, Bacia (SC). 3. Desassoreamento. 4. Ecotoxicidade. 5. Sustentabilidade. 6. Insumos minerais. 7. Construção civil. I. Título.

CDD 23. ed. 627.122098164

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Silvia Sartor Roseng

Caracterização de sedimentos fluviais do Rio Urussanga como potencial insumo mineral para a indústria da construção civil

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais), da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC.

Criciúma, 20 de agosto de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Junca

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Sérgio Luciano Galatto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Lisandro Simão

Universidade de Ribeirão Preto - UNAERP

Dedico esta dissertação à comunidade que sofre com as cheias do rio Urussanga, na esperança de que o conhecimento gerado aqui possa ser parte das soluções que tanto precisamos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao meu orientador, Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira, pela orientação segura, pelas valiosas contribuições e pela confiança depositada no meu trabalho ao longo desta trajetória.

Ao meu co-orientador, Dr. Alexandre Zaccaron, expresso minha profunda gratidão por sua escuta atenta, apoio constante e, sobretudo, por nunca ter permitido que eu desistisse. Seu incentivo foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Agradeço à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), pela estrutura e oportunidades oferecidas, bem como ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGCEM) e todo corpo docente, pela base sólida de formação e pelo ambiente de crescimento acadêmico. Em especial ao professor Elidio Angioletto e aos bolsistas do Laboratório de Biomateriais e Materiais Antimicrobianos (LADEBIMA) pelo auxílio nos bioensaios.

Ao Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC), pelo apoio dos laboratórios em alguns dos ensaios, por meio do Prof. Dr. Manuel Ribeiro e da aluna Eduarda Fraga Olivo.

Sou grata também ao CNPq, pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa (Processo n. 381236/2023-4). Estendo aos demais colegas do Projeto CNPq/CT-Mineral do Arranjo Produtivo Local (APL) de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça, Emily Saviatto, Grasielle Amoriso Benedet, Wagner Benedet Rebelo e Paulo Fernandes, pela parceria na caminhada.

Aos colegas do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga meu muito obrigado pelas informações e rodadas de troca de informações, sempre muito valiosas para o avanço desse estudo.

À minha família, agradeço por todo o amor, paciência e compreensão ao longo desse processo, especialmente nos momentos mais desafiadores. Sem o suporte de vocês, nada disso teria sido possível.

Aos amigos que estiveram presentes com palavras de incentivo, escuta generosa e companhia nas horas difíceis, deixo meu mais sincero agradecimento.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação, o meu muito obrigada.

"O futuro depende do que fazemos
no presente."

Mahatma Gandhi

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo caracterizar os sedimentos fluviais do Rio Urussanga, localizado no sul do estado de Santa Catarina, a fim de avaliar sua viabilidade como insumo mineral alternativo para a indústria da construção civil. O assoreamento do rio, intensificado por atividades minerárias, agrícolas e urbanas, tem causado impactos ambientais e sociais significativos, incluindo enchentes frequentes nas regiões próximas ao rio. Considerando a grande quantidade de material sedimentar removido durante as obras de desassoreamento, busca-se propor soluções ambientalmente adequadas para sua destinação, alinhadas aos princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável. A metodologia adotada baseou-se na sistemática CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade), envolvendo análises físico-químicas, mineralógicas, térmicas, ecotoxicológicas e legais dos sedimentos. As coletas foram realizadas em quatro pontos distintos do rio, usando como referência o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) desenvolvido em 2014 pelo IPAT/UNESC. As amostras passaram por ensaios de lixiviação e solubilidade, conforme as normas da ABNT, sendo posteriormente submetidas a testes de toxicidade com *Daphnia magna*, *Artemia salina* e *Allium cepa*. Além disso, foram realizadas análises granulométricas, de difração de raios-X (DRX), fluorescência de raios-X (FRX) e análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) bem como a realização do processo de ceramização em corpos de prova prensados e nova análise de acordo com a ABNT NBR 10004:2004. Os resultados indicam que os sedimentos apresentam elevadas concentrações de ferro, alumínio e manganês no extrato solubilizado (Fe: até 22 mg/L; Al: 0,55–3,21 mg/L; Mn: 0,15–1,1 mg/L). Os ensaios químicos evidenciaram toxicidade associada principalmente ao ferro e ao manganês. A análise temporal, ao longo de 10 anos, revelou redução de até 90% nesses parâmetros, indicando melhora gradual da qualidade ambiental dos sedimentos. A caracterização dos quatro pontos amostrais de sedimento indica predominância de quartzo (areia), com teores variando de aproximadamente 55 a 77%, seguido por feldspatos entre 7,6 e 22% e argilominerais entre cerca de 7,5 e 37,5%. A ceramização como técnica de tratamento dos sedimentos mostrou-se eficiente na imobilização de metais pesados, reduzindo a solubilização e tornando o material mais seguro para uso em aplicações construtivas. As análises pós-queima (1.100 °C) indicaram o potencial uso destes materiais em produtos para a construção civil, como cerâmica vermelha, minimizando os teores de Al <0,2 mg/L, Fe < 0,3 mg/L e Mn

< 0,1 mg/L. Artefatos e pavimentos cimentícios também são alternativas para emprego dos sedimentos arenosos. Conclui-se que os sedimentos do Rio Urussanga, devidamente caracterizados e tratados, possuem potencial técnico e ambiental para serem reutilizados como insumo na construção civil. Essa alternativa representa não apenas uma solução para a gestão de resíduos de desassoreamento, mas também uma estratégia de circularidade mineral voltada ao desenvolvimento regional sustentável. A proposta contribui para a mitigação dos impactos ambientais locais e promove o uso responsável dos recursos naturais, sendo uma ação promissora de integração entre engenharia de materiais e preservação ambiental.

Palavras-chave: sedimentos fluviais; desassoreamento; sustentabilidade; construção civil; ecotoxicidade; CPQvA.

ABSTRACT

This dissertation aims to characterize the river sediments of the Urussanga River, located in the southern state of Santa Catarina, in order to assess their viability as an alternative mineral input for the construction industry. Siltation of the river, intensified by mining, agricultural, and urban activities, has caused significant environmental and social impacts, including frequent flooding in the regions surrounding the river. Considering the large amount of sedimentary material removed during dredging works, we seek to propose environmentally appropriate solutions for its disposal, aligned with the principles of the circular economy and sustainable development. The methodology adopted was based on the CPQvA (Classification, Potential, Quantity/viability, and Applicability) system, involving physical-chemical, mineralogical, thermal, ecotoxicological, and legal analyses of the sediments. Samples were collected at four different points along the river, using the Environmental Impact Assessment (EIA) developed in 2014 by IPAT/UNESCO as a reference. The samples underwent leaching and solubilization tests in accordance with ABNT standards, and were subsequently subjected to toxicity tests with *Daphnia magna*, *Artemia salina*, and *Allium cepa*. Additionally, granulometric analyses, X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), and differential thermal and thermogravimetric analysis (DTA/TG) were performed. The results indicate that the sediments exhibit high concentrations of iron, aluminum, and manganese in the solubilized extract (Fe: up to 22 mg/L; Al: 0.55–3.21 mg/L; Mn: 0.15–1.1 mg/L). Chemical assays evidenced toxicity mainly associated with iron and manganese. A temporal analysis over a 10-year period revealed a reduction of up to 90% in these parameters, indicating a gradual improvement in the environmental quality of the sediments. The characterization of the four sediment sampling points indicates a predominance of quartz (sand), with contents ranging from approximately 55 to 77%, followed by feldspars between 7.6 and 22% and clay minerals between about 7.5 and 37.5%. Ceramization as a sediment treatment technique proved effective in immobilizing heavy metals, reducing their solubilization and making the material safer for use in construction applications. Post-firing (1,100 °C) analyses indicated the potential use of these materials in construction products, such as clay ceramics, minimizing concentrations to Al < 0.2 mg/L, Fe < 0.3 mg/L, and Mn < 0.1 mg/L. Cement-based products and pavements are also alternative applications for the use of sandy sediments. It is concluded that the sediments of the Urussanga River, properly characterized and

treated, have the technical and environmental potential to be reused as inputs in civil construction. This alternative represents not only a solution for the management of dredging waste, but also a mineral circularity strategy aimed at sustainable regional development. The proposal contributes to the mitigation of local environmental impacts and promotes the responsible use of natural resources, representing a promising integration between materials engineering and environmental preservation.

Keywords: fluvial sediments; dredging; sustainability; construction materials; ecotoxicity; CPQvA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga	23
Figura 2 - Imagem Rio Urussanga na região de Morro da Fumaça revelando o material assoreado no seu leito.....	25
Figura 3 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas na valorização dos sedimentos com base nos critérios da sistemática CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade).....	31
Figura 4 - Os quatro trechos definidos no EIA de 2014 para execução do projeto de desassoreamento, o qual foi utilizado como base para definição da amostragem para a coleta deste trabalho.	33
Figura 5 - Localização das estações de amostragem de sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga (BHRU) utilizado neste trabalho com referência ao EIA de 2014.....	34
Figura 6 - Representação da sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.	35
Figura 7 - Imagem do teste de solubilização realizado nos quatro pontos amostrais.	38
Figura 8 - Ensaio de toxicidade com <i>Allium cepa</i> , realizado a partir da exposição das raízes ao extrato aquoso dos sedimentos coletados.	39
Figura 9 - Imagens dos corpos cerâmicos pós queima preparados apenas com os sedimentos estudados.	44
Figura 10 - Boxplot do número de raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.	55
Figura 11 - Boxplot da massa das raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.	56
Figura 12 - Boxplot do comprimento médio das raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.	57
Figura 13 - Classificação granulométrica, obtido por peneiramento, através da Escala Granulométrica de Wentworth, (1922), da 1ª campanha em 2014, comparando com a coleta realizada em 2024.	59
Figura 14 - Difratoformas de raios-X dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.....	62
Figura 15 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.....	63

Figura 16 - Imagem da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga com indicação das indústrias de cerâmica vermelha e de artefatos de cimento.....	66
Figura 17 - Imagem da eflorescência nas amostras do PU2 e PU4, onde ocorreram este fenômeno físico-químico naturalmente.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição e localização das estações de amostragem de sedimentos.	33
Tabela 2 - Classificação do grau de poluição dos sedimentos utilizando concentração total de ferro e manganês (mg/kg)	37
Tabela 3 - Classificação dos sedimentos como referência a Escala Granulométrica de Wentworth, (1922).	41
Tabela 4 - Levantamento estimado em 2014 no EIA do volume de sedimentos a serem removidos por trecho estudado.	43
Tabela 5 - Resultados da classificação dos quatro pontos de estudo, destacando em vermelho os acima do limite da norma referência.	47
Tabela 6 - Características da água intersticial dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2014.	49
Tabela 7 - Características da água intersticial dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2024.	49
Tabela 8 - Características químicas dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2014.	50
Tabela 9 - Características químicas dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2024	51
Tabela 10 - Comparativo dos parâmetros de ferro e manganês, nas campanhas de 2014 e 2024, nos diferentes pontos amostrais.	52
Tabela 11 - Resultado do ensaio de toxicidade Aguda com <i>Daphnia magna</i> como bioindicador.	52
Tabela 12 - Valores de ecotoxicidade em <i>Allium cepa</i> , ilustrando os valores de número de raízes, sua massa e comprimento.	53
Tabela 13 - Valores obtidos pelo cálculo da inibição percentual do crescimento da raiz (IPCR) nos diferentes pontos amostrais.	55
Tabela 14 - Taxa de mortalidade média de <i>Artemia salina</i> nos diferentes pontos amostrais.	58
Tabela 15 - Caracterização química obtido por FRX dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.	61
Tabela 16 - Quantitativo dos minerais dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais obtidos por Rietveld.	62
Tabela 17 - Estimativa de quantidade de material a ser dragado com base na granulometria dos sedimentos.	65
Tabela 18 - Comparativo dos parâmetros de alumínio, ferro e manganês, perante o ensaio de solubilização segundo ABNT	

	NBR10.004:2004, nos diferentes pontos amostrais, no material bruto e após processo de ceramização.....	67
Tabela 19 -	Principais usos do sedimento, com base em sua tipologia granulométrica.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV - Análise do Ciclo de Vida
ALESC - Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina
APL - Arranjos Produtivos Locais
ATD/TG - Análise Térmica Diferencial e Termogravimétrica
BHRU - Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cfa - Clima subtropical úmido
CIWEM - *Chartered Institution of Water and Environmental Management*
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
COOPEMI - Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga
CVMF - Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça
EIA/RIMA - Estudo de Impacto Ambiental/ Relatório de Impacto Ambiental
FATMA - Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina
FD - Fator de Diluição
FRX - Fluorescência de raios X
FT - Fator de toxicidade
FUMAF - Fundação do Meio Ambiente de Morro da Fumaça
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Igeo - Índice de Geoacumulação
IMA - Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
IPAT - Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas
IPCR - Inibição Percentual do Crescimento da Raiz
NBR - Norma Brasileira
NIST - *National Institute of Standards and Technology*
P.F. - Perda ao Fogo
PDF - *Powder Diffraction File*
RH - Região Hidrográfica
SC - Santa Catarina

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SINDICER - Sindicato da Industria de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça
SMEWW - *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*
UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense
USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS (APL)	22
2.1.1	APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça	22
2.2	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUSSANGA	23
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO.....	25
2.4	ASPECTOS LEGAIS DO USO DE SEDIMENTO.....	29
3	METODOLOGIA	31
3.1	LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE SEDIMENTOS.....	32
3.2	SISTEMÁTICA CPQVA.....	35
3.2.1	Classificação	36
3.2.1.1	Classificação ambiental.....	36
3.2.1.2	Análise química ambiental.....	36
3.2.1.3	Ecotoxicidade.....	37
3.2.1.4	Granulométrica.....	40
3.2.2	Potencialidade	41
3.2.3	Quantidade/ viabilidade	42
3.2.4	Aplicabilidade	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	CLASSIFICAÇÃO	46
4.1.1	Classificação ambiental	46
4.1.2	Análise química ambiental	48
4.1.3	Ecotoxicidade	52
4.1.4	Granulométrica	58
4.2	POTENCIALIDADE	60
4.2.1	Análise química	60
4.2.2	Análise mineralógica	61
4.2.3	Análise térmica	63
4.3	QUANTIDADE/ VIABILIDADE	64
4.4	APLICABILIDADE	66
4.4.1	Possibilidades de aplicações dos sedimentos na construção civil	69
	CONCLUSÃO	72
	SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do rio Urussanga se localiza no sul do Estado de Santa Catarina, e é caracterizada pela sua rica biodiversidade e diversos ecossistemas, sendo uma fonte de água para as comunidades locais de apoio à agricultura e as indústrias da região inseridas na região do APL mineral de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça. Conforme o Diagnóstico dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Urussanga (de Albuquerque Junior *et al.*, 2020), existem diversos usos de solo como agricultura, área de mineração, área urbanizada e/ou construída, pastagens e campos naturais e áreas de reflorestamento, totalizando cerca de 68,2% da área total da bacia. Aproximadamente 1,0% do uso do solo na Bacia do rio Urussanga é utilizado por áreas de mineração. Sabe-se que as atividades ligadas à mineração atuam como base de segmentos industriais e desempenham papel considerável na economia nacional, principalmente como geradora de empregos e renda (Calaes, 2009; Rocha, 2011), contudo, o processo de extração mineral é considerado como uma das atividades mais degradantes, gerando inúmeros impactos sobre o meio, como poluição da água, ar, solo, sonora, visual, vibração e danos à saúde (de Oliveira, 2006).

A bacia hidrográfica formada pelos rios América e Carvão é a que apresenta os maiores impactos decorrentes das atividades da indústria carbonífera, encontrando-se com seus corpos d'água em estado de grave contaminação. As águas da região caracterizam-se por baixo valor de pH, elevada acidez e altas concentrações de metais tóxicos, sobretudo em razão da expressiva carga de drenagem ácida proveniente de minas de carvão. Essas drenagens apresentam concentrações elevadas de ferro, manganês, entre outros metais, configurando extensas áreas de passivos ambientais deixados pela atividade carbonífera na região sul de Santa Catarina. (Castilhos *et al.*, 2010).

De acordo com Vestena (2008), os sedimentos desempenham um importante papel nos ambientes aquáticos já que são fontes de alimento e habitat para a fauna aquática. Menos de 1% das substâncias que atingem o sistema aquático são dissolvidas em água, e conseqüentemente, mais de 99% são armazenadas no compartimento sedimentar. Por este fato, de acordo com Ribeiro *et al.* (2007), os sedimentos representam uma ferramenta essencial na avaliação do grau de contaminação desses poluentes, tendo em vista que são representativos dos processos que ocorrem nos sistemas hídricos. Apesar de alguns metais em baixas concentrações serem essenciais aos seres vivos, como Fe, Zn e Mn, em altas concentrações, eles podem ser tóxicos. Outros metais, como

mercúrio, chumbo, cádmio, cromo e níquel, de acordo com Esteves (1998), não têm função biológica conhecida e geralmente apresentam toxicidade aos organismos. A maior parte dos metais dissolvidos transportados pelas águas naturais é, sobre certas condições físico-químicas normais, rapidamente adsorvida na matéria particulada. Entretanto, a imobilização dos metais nos sedimentos de fundo não necessariamente permanece nesta condição, podendo ser liberados como resultado de alterações químicas no ambiente aquático. O meio de transporte dos metais no sedimento é a água intersticial, sendo que os principais componentes que afetam a taxa de metais transportados são matéria orgânica, Fe e Mn (Förstner; Wittmann, 1981). As concentrações de poluentes nos sedimentos tornam-se várias ordens de grandeza maiores do que nas águas correspondentes, o que possibilita o uso dos sedimentos como bons indicadores de poluição ambiental, tanto atual como remota.

O assoreamento em um rio pode ser causado por vários fatores, incluindo erosão do solo, derramamento de sedimentos, práticas de utilização do solo, planejamento e construção inadequados, crescimento excessivo de nutrientes e algas, e redução do fluxo de água (Accorsi *et al.*, 2017). Em paralelo às atividades que estão associadas a geração sedimentar na bacia, são ocasionadas enchentes frequentemente na região do APL mineral, principalmente as margens do Rio Urussanga, as quais trazem efeitos negativos a população que ali reside.

Segundo Goes Filho (2004), o tratamento de sedimentos pode ser definido como um meio de processar material dragado contaminado, com o intuito de reduzir a concentração do contaminante, enquadrando-o em procedimentos e normas de aceitação. São bastante variadas as formas de tratamento, que utilizam desde técnicas de separação à incineração. Estudos demonstraram que variações nos processos sedimentares e na morfologia do canal podem alterar a sua morfodinâmica em múltiplas escalas espaço-temporais, levando, em última análise, a um impacto no risco de inundação. Existem várias medidas importantes que podem ser tomadas nos rios para mitigação de enchentes, sendo o desassoreamento uma forma rápida para auxiliar no aceleração do fluxo do rio, escoando de forma mais eficaz (CIWEM, 2014). Porém, outras medidas de gestão do risco de inundação, como a recuperação de rios e a reconexão de planícies aluviais, também podem ser eficazes na redução do risco de inundação e na proteção do ambiente (Croke; Thompson; Fryirs, 2017).

Portanto, uma das formas de prevenção dos episódios de enchentes é a realização de obras de intervenção para retirada e limpeza dos sedimentos acumulados ou assoreados, denominadas de desassoreamento. Essas obras removem grandes quantidades de

sedimentos, que necessitam de uma destinação final apropriada, normalmente sendo direcionados para disposição em aterro. Desta forma, para o alinhamento do desenvolvimento sustentável regional, torna-se importante inserir a gestão destes resíduos nas ações circulares de preservação de recursos naturais e de caráter socioambiental para avanços apropriados do uso de recursos com as atividades produtivas da região.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos os problemas enfrentados pelas comunidades situadas nas proximidades do rio Urussanga têm se intensificado em função do assoreamento da calha do rio, ocorrendo enchentes e contaminação das águas, causando danos como inundações de pastagens, bloqueio de rodovias pavimentadas e não pavimentadas, e principalmente para os moradores e suas residências atingidas pelas cheias. A obra de desassoreamento do rio Urussanga é um projeto de grande porte a ser executado em diferentes trechos do rio, conforme apresentado em 2014 ao Órgão Ambiental Estadual (na época FATMA) para emissão da Autorização para realização das obras, considerando a necessidade de minimizar os problemas das enchentes, além para promover melhorias no desenvolvimento econômico desta região.

A calha do rio Urussanga tem extravasamentos frequentes nas cidades que o rio passa. Dessa maneira, obras de desassoreamento e limpeza são necessárias para a retirada de sedimentos acumulados visando à redução de futuros prejuízos à população como formas de prevenção dos episódios de enchentes. Porém, essas obras removem grandes quantidades de sedimentos que necessitam de uma destinação final apropriada. A falta de conhecimento do tipo e teor de contaminação presente nos sedimentos prejudica a seleção correta da destinação e disposição mais conveniente e apropriada. Desse modo, o levantamento de alternativas de destinação final é necessário para diminuir os impactos causados por sua deposição em locais inadequados ou mesmo da sua manutenção na área de remoção (Heinrich *et al.*, 2015). Além disso, o sedimento retirado pode apresentar outras possibilidades de destinação e uso, desde que sejam conhecidas as suas características, incluindo as possibilidades do uso da construção civil.

Ao investigar a caracterização e a potencial aplicação de sedimentos fluviais como materiais alternativos, esta pesquisa apresenta contribuição direta para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Em

especial, destaca-se a relação com o ODS 6 (Água potável e saneamento), ao abordar aspectos ligados à qualidade ambiental de corpos hídricos e ao monitoramento de sedimentos potencialmente contaminados. Além disso, o estudo se vincula ao ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ao propor a valorização de materiais sem destinação adequada, promovendo práticas alinhadas à economia circular e ao uso eficiente de recursos naturais. A pesquisa também dialoga com o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao aplicar metodologias inovadoras de avaliação multicritério, como a sistemática CPQvA, para viabilizar soluções sustentáveis na incorporação desses materiais em produtos existentes ou de concepção inovadora. Adicionalmente, ao contribuir para a mitigação de passivos ambientais e a preservação de ecossistemas, o trabalho se relaciona aos ODS 14 (Vida na água) e ODS 15 (Vida terrestre), reforçando seu papel no desenvolvimento sustentável e na recuperação ambiental de áreas impactadas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Caracterizar os sedimentos do Rio Urussanga, com o propósito de analisar alternativas de destinação e de potencial uso como material de construção civil, verificando implicações ambientais e dos níveis de poluição.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar, classificar e avaliar a toxicidade dos sedimentos para verificar o potencial de aplicabilidade.
- b) Efetuar as caracterizações de amostras de sedimentos coletados em pontos planejados por meio de técnicas experimentais para conhecer suas propriedades;
- c) Avaliar as alterações nos parâmetros existentes nos sedimentos após o processo de ceramização.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ARRANJOS PRODUTIVOS LOCAIS (APL)

Arranjos Produtivos Locais são agrupamentos de empresas, localizadas em um mesmo território, apresentando especialização produtiva e que possuam vínculos de articulação, interação, cooperação e aprendizagem entre si e com outros atores locais, tais como: governo, associações empresariais, instituições de crédito, ensino e pesquisa (Cardoso; Carneiro; Rodrigues, 2014).

Estes arranjos produtivos locais formados por aglomerações territoriais de agentes econômicos, políticos e sociais possuem foco em um conjunto específico de atividades econômicas. Geralmente envolvem a participação e a interação de empresas produtoras de bens e serviços, fornecedoras de insumos e equipamentos, prestadoras de consultoria e serviços, comercializadoras, clientes, entre outros. Podem incluir também diversas outras organizações públicas e privadas voltadas para: formação e capacitação de recursos humanos - como escolas técnicas e universidades; pesquisa, desenvolvimento e engenharia; política, promoção e financiamento.

A partir de seu desenvolvimento no final dos anos 90, a abordagem de arranjos produtivos locais (APLs) teve propagação rápida no país. Desde então, os esforços realizados para o seu entendimento e promoção foram pioneiros e importantes, com um intenso processo de aprendizado e de incorporação de conhecimentos (Lastres *et al.*, 2014).

Os "Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral" é uma expressão que se refere aos APLs que atuam em torno de uma cadeia produtiva baseada na atividade extrativa e de transformação mineral. Esses APLs têm como objetivo promover a sustentabilidade e o desenvolvimento econômico e social das diferentes regiões do país, por meio de ações que desenvolvem o setor mineral (Marques *et al.*, 2010).

2.1.1 APL Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça

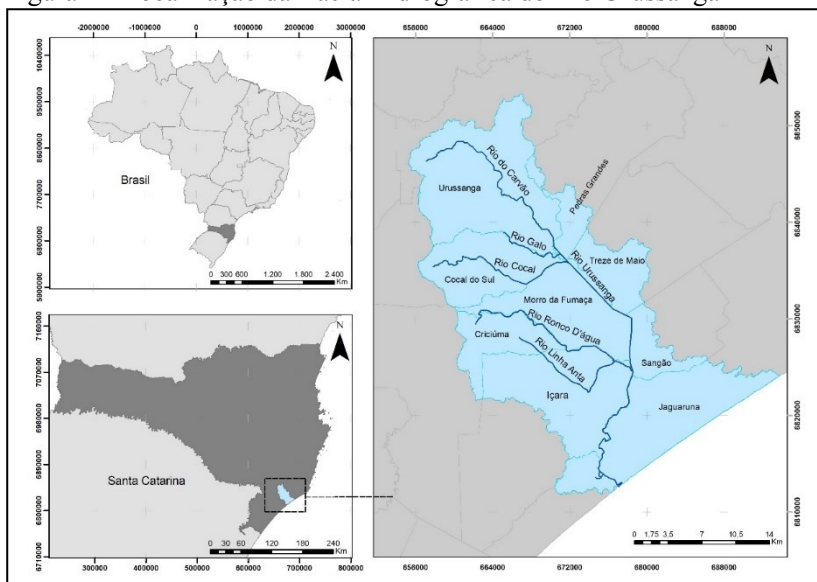
Na região sul de Santa Catarina se concentra o maior polo de cerâmica vermelha do estado, responsável por aproximadamente 2,5 % de produção do país (ALESC, 2012). Dados do Sindicato da Indústria de Cerâmica Vermelha (SINDICER) e da Cooperativa de Exploração Mineral da Bacia do Rio Urussanga (COOPEMI), apontam que as indústrias do setor giram entorno de 100 empresas, o que mostra grande importância do segmento à economia local. O polo cerâmico de Morro da

Fumaça, que conta com outros 6 municípios: Sangão, Içara, Treze de Maio, Jaguaruna, Criciúma e Cocal do Sul, se desenvolveu a partir da década dos anos 1970, majoritariamente as margens do Rio Urussanga, associado a qualidade da matéria prima base para produção de telhas e tijolos – a argila. Devido à grande importância do setor minero-ceramista para a região, em 2012 foi criado o “Arranjo Produtivo Local de Cerâmica Vermelha de Morro da Fumaça (APL-CVMF)”, para poder organizar a estrutura do setor (Cruz, 2023).

2.2 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUSSANGA

A Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga (BHRU) abrange em seu território dez municípios, sendo Morro da Fumaça e Cocal do Sul totalmente inseridos dentro da bacia hidrográfica e Balneário Rincão, Criciúma, Içara, Pedras Grandes, Treze de Maio, Sangão, Jaguaruna e Urussanga estão parcialmente inseridos, totalizando uma área territorial de 67.968,76 ha. A BHRU (Figura 1) está inserida na Região Hidrográfica (RH10), localizada no sul do estado de Santa Catarina, conforme a lei nº 10.949 (SC, 1998), que dispõe sobre a caracterização do Estado em dez Regiões Hidrográficas.

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga



Fonte: Autora (2024).

O principal rio da bacia hidrográfica, o rio Urussanga, é formado pela confluência do rio Carvão e rio Maior, no município de Urussanga. Na sua margem esquerda são afluentes do rio Urussanga: rio Barro Velho, rio da Areia e rio Varjedo. Os afluentes do rio Urussanga em sua margem direita são mais expressivos quanto ao volume de d'água por drenagem: rio América, rio Caeté, que recebe os rios Deserto e do Salto; rio Cocal, que tem como contribuinte os rios Tigre e Barbosa, rios Ronco d'Água e Linha Anta.

O tipo climático da área de estudo, segundo a classificação climática de Köppen, é o *Cfa*, ou seja, clima subtropical com temperatura média do mês mais frio, que é junho, de 14,5°C. O mês que apresenta temperatura média mais alta é fevereiro, com 24,1°C. A região não possui estação seca definida, geadas pouco frequentes e predisposição de concentrações das chuvas nos meses de verão. O índice pluviométrico varia de 1220 a 1660 mm, com 102 a 150 dias de chuvas anuais, e umidade relativa do ar com uma variação entre 81,4% a 82,2% (Cury, 2018).

Segundo o IBGE (1992) a vegetação da área de estudo é composta pela Floresta Ombrófila Densa e nas faixas litorâneas, em menor proporção, formação pioneira (Restingas). O solo da bacia do rio Urussanga apresenta uma grande variação litológica proveniente dos intemperismos físicos e químicos, as formas do relevo da região podem ser caracterizadas por três unidades geomorfológicas: as Serras Costeiras, compostas por rochas cristalinas com o relevo se deteriorando à medida que se aproxima do litoral; a Planície Meridional, que se encontra entre a Serra Geral; e as Serras Cristalinas Costeiras, composta por rochas gonduânicas, com o relevo com feições marcantes, vales encaixados e vertentes íngremes; e a Planície Costeira, com complexas formas de modelado continental-marinho, provenientes de processos de acumulação ocorridos a partir do Terciário, abrangendo planícies litorâneas e aluviâres-deltaicas (Cury, 2018).

Na extensão da bacia do rio Urussanga, são apresentados diferentes tipos de unidades geológicas, com destaque para a presença de afloramento de rochas sedimentares (Krebs, 2004). Segundo o Plano de Recursos Hídricos da Bacia do rio Urussanga (de Albuquerque Junior *et al.*, 2020), a maior parte desta Bacia encontra-se em regiões planas e onduladas, com pouca presença de superfícies íngremes, o que, aliado à presença de vegetação nas regiões próximas aos mananciais, favorece a infiltração e a diminuição da velocidade de escoamento superficial das águas de chuva.

A Figura 2 ilustra trecho do Rio Urussanga em Morro da Fumaça, destacando o sedimento no fundo do rio que atinge a superfície da água.

Figura 2 - Imagem Rio Urussanga na região de Morro da Fumaça revelando o material assoreado no seu leito.



Fonte: Acervo Fundação do Meio Ambiente de Morro da Fumaça - FUMAF (2023).

Na região sul catarinense as atividades agrícolas, a pecuária e a extração de carvão mineral atuaram sinergicamente para a degradação ambiental da bacia hidrográfica do rio Urussanga. De acordo com de Menezes; Waterkemper (2009), extensas áreas foram degradadas e tiveram seus recursos naturais comprometidos devido às lavras de carvão, tanto a céu aberto quanto subterrânea, poluindo as águas, contaminando o solo e invadindo terras agricultáveis. A bacia hidrográfica do Rio Urussanga possui 17% dos seus rios comprometidos pela mineração do carvão, totalizando 256,8 km de curso hídrico, e em 161,6 km o pH se encontra abaixo de 4,5, indicando a acidez daquele meio (Domingos Cury *et al.*, 2021).

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO SEDIMENTO

O sedimento pode ser considerado como o compartimento resultante da integração de todos os processos que ocorrem em um

ecossistema aquático. Do ponto de vista de ciclagem de matéria e fluxo de energia, o sedimento é um dos compartimentos mais importantes dos ecossistemas aquáticos continentais. Nele ocorrem processos biológicos, físicos e químicos, que influenciam no metabolismo de todo o sistema. Além disso, o sedimento, devido à sua composição química e biológica é de fundamental importância no estudo da evolução histórica de ecossistemas aquáticos e terrestres (Del Grande; Rezende; Rocha, 2003).

O sedimento possui a capacidade de acumular compostos, fazendo deste compartimento um dos mais importantes na avaliação do nível de contaminação dos ecossistemas aquáticos. A importância das abordagens integradas de análises físicas, químicas e biológicas reflete em dados mais adequados sobre a toxicidade do ambiente. O sedimento que se deposita em canais de irrigação cria sérios problemas devido à elevação do nível de água, redução do volume de água e danos às plantações; a obstrução de desvios e escoadouros com sedimento também reduz a quantidade de água disponível (Cardozo, 2017). O mesmo autor afirma ainda que a inundação com sedimento grosso em áreas irrigadas reduz a fertilidade dos solos, enquanto o sedimento coloidal reduz a permeabilidade, sendo que os dois casos reduzem a fertilidade das terras irrigadas. Além disso, os sedimentos podem agir como possíveis fontes de poluição, como, por exemplo, elementos-traço, os quais não são permanentemente fixados por eles, podendo ser novamente disponibilizados para a coluna de água, através de variações nas condições ambientais tais como mudanças de pH e de potencial redox. Segundo Restrepo (2007) nos sedimentos de rios e lagos, os materiais inorgânicos, como óxidos, hidróxidos, assim como os materiais orgânicos, podem ser um importante meio para avaliação do nível de contaminação ambiental, pois permitem a ocorrência de trocas químicas com a coluna de água. O sedimento desempenha um papel importante no esquema de poluição dos rios por metais pesados. Ele reflete a qualidade corrente do sistema aquático e pode ser usado para detectar a presença de contaminantes que não permanecem solúveis após seu lançamento em águas superficiais. Mais do que isso, o sedimento age como um carreador e possível fonte de poluição, pois os metais pesados não são permanentemente fixados por ele, e podem ser ressolubilizados para a água por mudanças nas condições ambientais e/ou antrópicas (Bostelmann, 2006).

O sedimento dos ambientes aquáticos pode ser utilizado no estudo de poluição, como indicador da presença e da concentração de metais pesados. Além disso, a análise de perfis de metais pesados permite o levantamento histórico da ação antrópica do local de estudo (da Cunha, 2012). Os sedimentos representam uma grande fonte de estudo, pois são

formados por material sólido carregado pelo vento, gelo e água da superfície da terra. Também se origina pela deposição de material orgânico, provenientes de animais e vegetais que vivem no local (Campagnoli; Mazzilli; Moreira, 1999). Ele constitui uma fase mineralógica com partículas de tamanhos, formas e composição química distinta. Esses materiais, em sua maioria, são depositados nos rios, lagos e reservatórios, durante muitos anos. Processos biogeoquímicos controlam o acúmulo e a redistribuição das espécies químicas. Outro fator que influencia a absorção e a retenção de contaminantes na superfície das partículas são o tamanho da partícula. A tendência observada é que quando o grão diminui, as concentrações de nutrientes e contaminantes aumentam. Esta tendência é devido ao fato de as pequenas partículas terem grandes áreas de superfície para a absorção por contaminantes (Bevilacqua, 1996).

Castilhos *et al.*, (2010) realizaram um estudo na Bacia Carbonífera Sul Catarinense, onde se utilizou como indicadores de qualidade ambiental o sedimento, além de análises físico-químicas em água, testes de toxicidade e análise de solos. Para avaliar o grau de contaminação dos metais em sedimentos, utilizaram a metodologia de Müller, (1979) baseada em cálculos do Índice de Geoacumulação (Igeo) com base em teores de background obtidos em folhelhos. Para avaliar os sedimentos em relação ao grau de poluição por metais, Thomas, (1987) utilizou três categorias para a poluição: não poluído, moderadamente poluído e altamente poluído. A CETESB, (2004) faz uso de 34 indicadores (variáveis) de qualidade de sedimento (físicos, químicos, hidrobiológicos e toxicológicos), considerando-se aqueles mais representativos.

No Estudo de Impacto Ambiental (EIA) (IPAT/UNESC, 2014) foi avaliado os motivos gerados do assoreamento do rio Urussanga, onde verificou-se que durante o trajeto amostral realizado, nos 42 km nas margens do rio Urussanga, foi registrada a presença de 100 focos desencadeadores de processos erosivos e/ou contribuintes com sedimentos para as drenagens e cursos d'água. Deste total, 34 focos foram registrados no Alto curso (2,8 focos/km), no Médio curso foram catalogados 32 focos, (2,3 focos/km) e no Baixo curso foram detectados 34 focos (2,1 focos/km), o que indica que em todos os trechos amostrados há significativa ocorrência dos focos de geração de sedimento.

Os motivos geradores foram classificados por origem rural, extrativa mineral, ocupação urbana e origem natural, onde também foram analisados o que ocasionou esses motivos, como falta de mata ciliar para pastagem, tipos de mineração, ocupação das margens dos rios, tipo de solo, entre outros. Os diversos usos do solo e atividades exercidas nas

áreas adjacentes ao rio, como um todo, tem a carência de práticas conservacionistas que previnam a erosão e o assoreamento (IPAT/UNESC, 2014).

Na análise da origem dos focos geradores de sedimento para o trecho todo do rio Urussanga (42 km), percebeu-se que origens do aporte de sedimentos com as maiores frequências registradas nos pontos amostrados, ficaram a cargo do plantio com ausência de práticas conservacionistas e/ou a implantação de pastagens em áreas inadequadas, com declividade acentuada (23%), escoamento superficial em estradas vicinais, de terra ou pavimentadas com saibro (22%), e supressões das matas ciliares para implantação de culturas ou pastagens (15%).

Na análise por trecho, o segundo trecho, o denominado Médio curso (14 km), encontrou-se 32 focos desencadeadores de processos erosivos, e contribuintes com cargas de sedimentos, sendo que o maior deste (25%) foram classificados como Minerações de Argilas. Os valores referentes ao trecho Médio se apresentam de forma semelhante ao observado para a análise do rio todo, exceto pela frequência em primeiro lugar dos focos verificados em áreas de extração de argila, estes que somados aos focos observados nas áreas de extração de areia, totalizam 41% neste trecho do rio (Médio curso), ocasionados primordialmente pelas atividades de extração mineral. Ao longo de praticamente todo este trecho, é destacada a presença de diversas áreas de extração de argila e areia, em atividade ou abandonadas, estas anteriormente lavradas para retirada de matéria-prima utilizada pelas olarias da região na fabricação de cerâmica estrutural e areia, para utilização na construção civil. Os processos erosivos nestas áreas ocorrem desde a instalação, onde grande quantidade de materiais desagregados (sedimentos) das áreas de extração são carregados para as drenagens, permanecendo ainda estes processos durante a operação, devido à falta de controle nos procedimentos de extração e beneficiamento, e ainda quando abandonadas, em virtude do descaso com a recuperação das áreas, tendo em vista que os procedimentos de recuperação destas áreas são praticamente inexistentes.

A atividade agrícola na bacia do Urussanga demonstrou neste trabalho ser um importante foco de geração de sedimentos, além de que esta atividade é também a principal usuária da malha viária rural, outro foco gerador de sedimentos. Outro foco importante de sedimentos transportados para o rio, observado no EIA (IPAT/UNESC, 2014), refere-se à indústria extrativa mineral.

2.4 ASPECTOS LEGAIS DO USO DE SEDIMENTO

Considerando que o material removido durante as atividades de dragagem demanda destinação, seja para uso benéfico, disposição em solo ou em águas sob jurisdição nacional, a legislação relacionada ao material de dragagem, solo e resíduos similares foi consultada para avaliar as diversas possibilidades de disposição ou de uso.

A Resolução CONAMA 454 (2012), a qual estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, aplica-se para fins de implantação, aprofundamento, manutenção ou ampliação de canais hidroviários, da infraestrutura aquaviária dos portos, terminais e outras instalações portuárias, públicos e privados, civis e militares, bem como às dragagens para outros fins, que não se aplicam às dragagens para fins de mineração.

De acordo com esta Resolução, para caracterizar as intervenções e os processos de dragagem, deverá ser apresentado ao órgão ambiental licenciador plano conceitual de dragagem, que conter um conjunto de dados e informações, o que inclui a delimitação das áreas de disposição propostas, com suas coordenadas georreferenciadas. O material a ser dragado deverá ser caracterizado de acordo com as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais definidos na Resolução CONAMA 454 (2012), e através de um Plano de Amostragem, definir as substâncias químicas a serem determinadas para a caracterização do material a ser dragado, podendo, de acordo com as fontes de poluição que interferem na área a ser dragada, proceder à eventual inclusão ou supressão de substâncias: (i) do Anexo II da Resolução CONAMA 420 (2009), para disposição em solo; (ii) da Tabela III do Anexo da Resolução CONAMA 454 (2012), para disposição em águas sob jurisdição nacional.

Para fins de avaliar as condições de disposição dos sedimentos, conforme cita a Resolução CONAMA 454 (2012), após a caracterização química do material a ser dragado, deve se proceder a sua classificação química, observando os seguintes critérios: (i) para avaliação das alternativas de disposição em solo, os resultados da caracterização química devem ser comparados com os valores orientadores nacionais estabelecidos para solos pela Resolução CONAMA no 420/2009 ou norma estadual vigente; (ii) para avaliação das alternativas de disposição em águas sob jurisdição nacional, os resultados da caracterização química devem ser comparados com os valores orientadores previstos na Tabela III do Anexo desta Resolução e classificados em dois níveis. Em casos de

disposição em águas sob jurisdição nacional, deverão ser realizados ensaios de ecotoxicidade, conforme 3ª Etapa do Anexo desta Resolução.

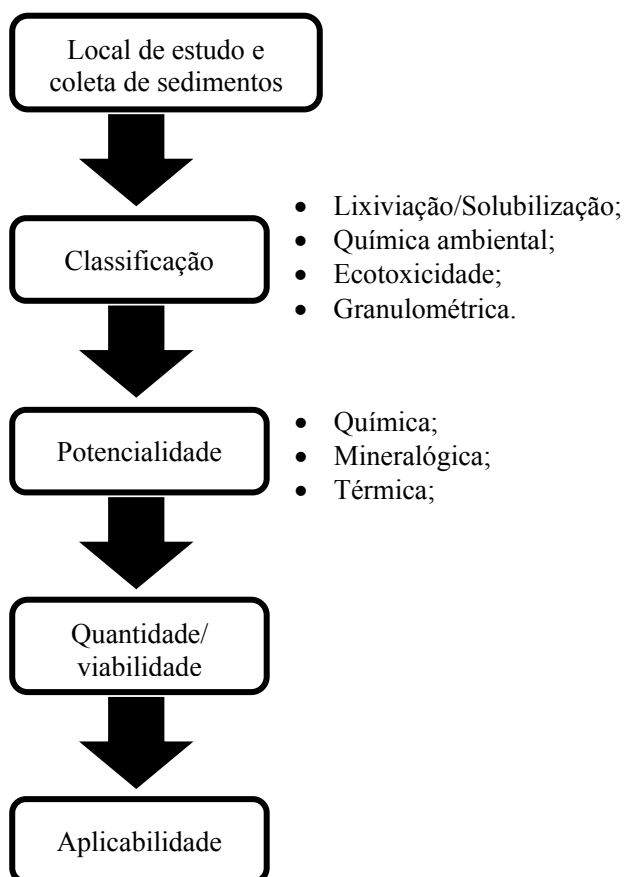
A mesma Resolução cita que os resultados dos ensaios ecotoxicológicos devem ser tomados como mais uma das linhas de evidência para o gerenciamento do material a ser dragado. O empreendedor deverá considerar, previamente à decisão sobre a disposição, a possibilidade da utilização benéfica do material dragado, de acordo com sua caracterização e classificação, bem como a avaliação ambiental e a análise da viabilidade econômica e operacional das opções de disposição, atendidas as regulamentações específicas e pertinentes.

Assim, a caracterização dos sedimentos exige análises físicas (como granulometria e teor de matéria orgânica), químicas (com a identificação de metais pesados, hidrocarbonetos, Tributílo-estanho, entre outros contaminantes) e, quando necessário, ecotoxicológicas, por meio de ensaios com organismos como anfípodes ou equinóides. Essas análises químicas devem ser comparadas aos valores orientadores estabelecidos pela resolução, sendo exigidos estudos complementares de risco ambiental caso os limites sejam ultrapassados. Além disso, deve-se definir com clareza o local de disposição do material dragado, justificando sua escolha com base em critérios ambientais, operacionais e legais, sendo vedada a diluição do material com sedimentos limpos. Por fim, é obrigatório o monitoramento das áreas dragadas e das áreas de disposição, visando a avaliação de impactos e a adoção de medidas corretivas, se necessário. Todo o processo deve ser submetido ao licenciamento ambiental junto ao órgão competente, com a apresentação de todos os documentos técnicos e estudos exigidos pela legislação vigente. Esse conjunto de etapas garante maior controle ambiental, segurança técnica e conformidade legal nas operações de desassoreamento (Frohlich; Napolini, Jr., 2015).

3 METODOLOGIA

A caracterização dos sedimentos acumulados ao longo do rio Urussanga, bem como seu potencial de valorização para uso na construção civil e afins foi realizada com base nas atividades descritas no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma com as etapas desenvolvidas na valorização dos sedimentos com base nos critérios da sistemática CPQvA (Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade).



Fonte: Autora (2024).

3.1 LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE SEDIMENTOS

O local de estudo foi ao longo do rio Urussanga, o qual é formado pela confluência dos rios Maior com o Carvão, e recebe os rios América, Caeté, Cocal, Ronco D'Água, Linha Torrens, Linha Anta, Três Ribeirões, Barro Vermelho, Ribeirão da Areia e Vargedo. A bacia do rio Urussanga está localizada no Extremo Sul Catarinense, ao norte da bacia do rio Araranguá, e abrange 10 municípios, com uma população aproximada de 118.439 habitantes distribuídos em uma área total 679,16 km² e corresponde a 0,70% do território catarinense.

Para a definição dos pontos de amostragem dos sedimentos, este estudo adotou a mesma metodologia utilizada no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de 2014, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Ambientais e Tecnológicas da UNESC (IPAT/UNESC), realizando as coletas nas mesmas coordenadas geográficas.

A escolha dessa abordagem baseou-se no histórico de estudos já realizados sobre o rio Urussanga, iniciados com a elaboração do referido EIA, que foi submetido ao órgão ambiental estadual — então FATMA, atualmente denominado Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) — como parte do processo de licenciamento ambiental para a execução das atividades de desassoreamento da época. O estudo original, conduzido pela Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), propôs a intervenção em quatro trechos distintos do rio: trecho 1 da estaca 0 a estaca 21+453,026; trecho 2 da estaca 21+453,026 a 40+64,663; trecho 3 da estaca 40+64,663 a 59+391,432; e trecho 4 da estaca 59+391,432 a 87+139,575, totalizando 43,50 km de extensão, conforme disponibilizado na Figura 4. Em cada trecho foi coletado um ponto para realizar a amostragem.

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) realizou duas campanhas de amostragem de sedimentos com o objetivo de caracterizá-los físico-quimicamente e avaliar suas condições ambientais, as quais foram repetidas nesse trabalho. Na primeira campanha, foram definidos quatro pontos ao longo do curso d'água em análise. Já na segunda, houve um aumento no número de amostras, seguindo as normas técnicas vigentes à época.

Para o presente estudo, os pontos utilizados na primeira campanha serviram como referência para a nova coleta de sedimentos, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 5. A partir dessas coletas, desenvolveu-se uma nova investigação com foco em diferentes parâmetros de caracterização.

Figura 4 - Os quatro trechos definidos no EIA de 2014 para execução do projeto de desassoreamento, o qual foi utilizado como base para definição da amostragem para a coleta deste trabalho.



Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

Tabela 1 - Descrição e localização das estações de amostragem de sedimentos.

Estação Amostral	Coordenadas UTM		Descrição da Estação no rio Urussanga
PU1	6845230 N	0664951 E	Após a confluência dos rios Carvão e Maior, em Urussanga
PU2	6835701 N	0671990 E	Sob a ponte em Estação Cocal, em Morro da Fumaça
PU3	6829770 N	0678375 E	Sob a ponte entre Sangão e Morro da Fumaça
PU4	6813512 N	0676284 E	Sob a ponte da Barra do torneiro, em Jaguaruna

Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

No estudo apresentado em 2014, em cada uma das estações amostrais (PU1 a PU4), conforme o EIA, a coleta foi realizada com Draga Birge-Ekman em 5 pontos transversais, obtendo-se 5 subamostras por ponto de coleta, composta por porções obtidas do meio do rio até suas margens, procedimento que foi igualmente reproduzido neste trabalho. Após as 5 coletas em cada ponto, as 4 amostras compostas foram encaminhadas ao laboratório e identificadas como PU1, PU2, PU3 e PU4, onde foram homogeneizadas e quarteadas formando uma amostra composta para cada estação amostral.

A Resolução CONAMA 454 (2012) que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, cita na Tabela 1 do seu anexo que a amostragem para cursos de água doce deverá ser coletada a uma distância máxima de quinhentos metros entre si nos trechos a serem dragados, independente do volume a ser movimentado, porém, para fins de análises iniciais, foi realizada a coleta conforme primeira campanha realizada no estudo do EIA.

Figura 5 - Localização das estações de amostragem de sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga (BHRU) utilizado neste trabalho com referência ao EIA de 2014.



Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

3.2 SISTEMÁTICA CPQvA

As pesquisas voltadas ao uso de materiais sem uso representam importantes avanços no campo da sustentabilidade. Com isso, a caracterização representativa de materiais alternativos através de um processo sistêmico de tomada de decisão multicritério fundamentada na sistemática de Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicabilidade (de forma abreviada, CPQvA) desenvolvido por Raupp-Pereira, (2006) são a base para estabelecer um guia sistêmico através da interação entre materiais e a viabilidade de aplicação em um produto existente ou de concepção inovadora que promova o desenvolvimento sustentável, representado na Figura 6.

Figura 6 - Representação da sistemática CPQvA para a valorização de resíduos.



Fonte: Adaptado de Acordi *et al.*, (2023).

As pesquisas voltadas ao uso de materiais sem destinação ou subutilizados representam importantes avanços no campo da sustentabilidade. Nesse contexto, a caracterização representativa de materiais alternativos por meio de um processo sistêmico de tomada de decisão multicritério, fundamentado na metodologia de Classificação, Potencialidade, Quantidade/Viabilidade e Aplicabilidade — abreviadamente CPQvA (desenvolvida por Raupp-Pereira, (2006)) — constitui a base para o estabelecimento de um guia sistêmico. Tal guia promove a interação entre os materiais e a viabilidade de sua aplicação em produtos existentes ou de concepção inovadora, visando ao desenvolvimento sustentável, conforme ilustrado na Figura 6.

Essa metodologia inovadora, estruturada a partir de quatro parâmetros, tem sido amplamente aplicada na comunidade científica para a valorização de resíduos (Acordi *et al.*, 2023; Machado *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2023; Rebelo *et al.*, 2024; Simão *et al.*, 2021; Vilaça *et al.*, 2022; Zocche *et al.*, 2023). Como diferencial, a presente pesquisa propõe a aplicação da sistemática CPQvA à valorização de sedimentos fluviais. Para contemplar as particularidades do material estudado — distinto dos resíduos tradicionalmente analisados por essa metodologia — foram implementados testes adicionais, bem como realizada uma análise complementar baseada no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) (IPAT/UNESC, 2014).

3.2.1 Classificação

3.2.1.1 Classificação ambiental

Com base no histórico de contaminantes do rio, ilustrado no EIA, foi realizado a classificação do material sedimentado conforme NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos (ABNT, 2004a), para avaliar a periculosidade dos sedimentos. As normas complementares NBR 10005 – Ensaio de Lixiviação (ABNT, 2004b), NBR 10006 – Ensaio de Solubilização (ABNT, 2004c) e a NBR 10007 – Amostragem de Resíduos (ABNT, 2004d), foram utilizadas. Esse ensaio visa avaliar o grau de contaminação que os sedimentos possam apresentar.

3.2.1.2 Análise química ambiental

Para análise dos fatores abióticos dos sedimentos, como pH, potencial de oxirredução (Eh), oxigênio dissolvido (OD) e salinidade alguns testes foram realizados segundo métodos da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* - SMEWW (Lipps; Braun-Howland; Baxter, 2023). As medidas de pH e Eh, foram obtidas por meio dos métodos 4500-H⁺ B (Potenciométrico) e 2580 B (Potenciométrico) respectivamente. O OD por sua vez, foi realizado conforme método 4500-O G (Eletrodo de Membrana). Por fim, a salinidade foi obtida conforme o método 2520 B (Condutométrico).

A salinidade intersticial foi medida com um refratômetro manual (ATAGO), mediante a extração, sob pressão, de algumas gotas de água intersticial. Medidas de pH e Eh (mV), foram obtidas com um equipamento da marca Metrhom 744, até 2 horas após a coleta, mediante

a inserção do eletrodo de vidro de pH e do eletrodo de platina (Eh) diretamente nos sedimentos (Baltzer, 1982; Garrels; Christ, 1965; Marius, 1985). O eletrodo para leituras de pH foi calibrado periodicamente com soluções-padrão de pH 4 e 7 (escala NIST) e os sulfetos, que ocasionalmente aderem ao eletrodo de platina, retirados com uma lixa extremamente fina para não danificar o metal (Garrels; Christ, 1965).

A determinação da matéria orgânica foi realizada pelo método titulométrico com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), que é feito através da oxidação da matéria orgânica pelo dicromato, seguida de titulação do excesso de dicromato com um agente redutor, como iodeto de potássio.

A determinação de nitrogênio total, foi obtida pelo método Kjeldahl, que é um método titulométrico que envolve três etapas principais: digestão, destilação e titulação. Essa técnica, amplamente utilizada para determinar o nitrogênio em amostras orgânicas, converte o nitrogênio orgânico em amônia, que é então titulada para determinar a quantidade total de nitrogênio.

Já para análise dos elementos usou-se as normas estabelecidas pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA, 3050B (USEPA, 1996) e 3051A (USEPA, 2007).

Com base nos dados obtidos, é possível avaliar o grau de poluição dos sedimentos, aferindo concentração total de ferro e manganês, conforme Campagna, (2005), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do grau de poluição dos sedimentos utilizando concentração total de ferro e manganês (mg/kg)

Parâmetros	Não poluído	Moderadamente poluído	Altamente poluído
Ferro	<17.000	17.000 – 25.000	>25.000
Manganês	<300	300 - 500	>500

Fonte: Campagna, (2005).

3.2.1.3 Ecotoxicidade

Para a avaliação da ecotoxicidade, foram realizados diferentes ensaios laboratoriais. Inicialmente, os mesmos quatro pontos de amostragem utilizados no EIA elaborado pelo IPAT/UNESC em 2014 foram retomados, com a reprodução dos testes ecotoxicológicos aplicados naquele estudo. Portanto, para considerar o aspecto ambiental no sentido de verificar se há algum potencial tóxico nos sedimentos devido os poluentes já conhecidos pelo histórico de mineração na região, foram realizados ensaios ecotoxicológicos na fração solubilizada obtida de

acordo com a NBR 12713 (ABNT, 2016). Dos quatro pontos amostrais, consistiu em expor indivíduos neonatos do microcrustáceo dulcícola *Daphnia magna* a diferentes diluições do agente-teste por um período de 48 horas, onde o efeito agudo é determinado através da imobilidade dos organismos. O resultado da análise é dado em FT – Fator de toxicidade que indica quantas vezes a amostra foi diluída com água controle.

Devido a influência da agricultura presente nos arredores do rio Urussanga, principalmente pela plantação de arroz, e em eventuais cheias, a água do rio invade as granjas, promoveu-se a realização de novos testes ecotoxicológicos. Inicialmente, as amostras, referente a cada um dos pontos amostrais, foram desidratadas em estufa (com fluxo de ar, marca DeLeo), à $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Posteriormente, desagregadas em almofariz de porcelana, até deixar um pó passante em malha 9 mm. O Material foi colocado para realizar a solubilização seguindo a ABNT 10006 (ABNT, 2004c), a uma agitação de 30 rpm, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Imagem do teste de solubilização realizado nos quatro pontos amostrais.



Fonte: Autora (2025).

Para o ensaio de solubilização (ABNT NBR 10006:2004) foram empregados 225 g de amostra, misturados com 900 mL de água deionizada, e após 5 min de agitação em baixa velocidade, deixou-se o material em repouso por 7 dias. Após 7 dias foi realizada filtração a vácuo. Mediu-se o pH e se chegou aos valores de $\text{pH} = 3,48$ para PU1; de $\text{pH} =$

4,53 para PU2; de pH= 5,70 para PU3; e de pH= 6,48 para PU4. O pH foi ajustado para ~ 7,00 utilizando-se NaOH 0,5M para as amostras onde o ajuste fez-se necessário. O líquido da solubilização com pH corrigido serviu para realizar os testes de ecotoxicidade.

Para a análise da influência que o rio tem ao invadir áreas agrícolas, o ensaio de toxicidade em *Allium cepa* sp. (cebola), foi realizado como bioindicador conforme literatura (Fiskesjö, 1988). As cebolas foram preparadas da seguinte forma:

- Corte de toda a raiz existente presa ao “prato” da cebola e após retirou-se a casca exterior seca (catafilo externo). As cebolas foram mantidas integras, sem “machucados” no decorrer do ensaio.
- Foi adicionado o volume de 50 mL de solução solubilizada previamente preparada (conforme as diluições) a um tubo Falcon de 50 mL;
- As cebolas foram colocadas de forma que a parte da raiz se mantivesse em contato com a amostra solubilizada, mantendo a temperatura ambiente durante 7 dias protegidas da incidência de luz;
- Houve reposição do extrato solubilizado nos tubos falcon a cada 24 h.

Na Figura 8 se ilustra o teste de toxicidade com *Allium cepa* após a montagem do experimento.

Figura 8 - Ensaio de toxicidade com *Allium cepa*, realizado a partir da exposição das raízes ao extrato aquoso dos sedimentos coletados.



Fonte: Autora (2025).

Após a realização do ensaio, foi medido para cada uma das amostras o número de raízes, o tamanho das maiores raízes e a massa das raízes, para interpretação dos resultados. O cálculo da inibição percentual do crescimento da raiz (IPCR) foi realizado para avaliar o efeito do

sedimento (nos diferentes pontos) no crescimento da raiz da cebola. Esse cálculo indica a porcentagem de redução no comprimento da raiz em relação ao branco (Morales, 2004). A Equação 1 foi usada para avaliação da IPCR.

$$IPCR = \frac{\bar{x}_B - \bar{x}_S}{\bar{x}_B} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$IPCR$ = Inibição percentual do crescimento da raiz (%);

\bar{x}_B = média de número de raízes na condição Branco;

\bar{x}_S = média de número de raízes para os diferentes teores de sedimento.

Realizou-se também o ensaio ecotoxicológico utilizando o microcrustáceo *Artemia sp* como bioindicador. O ensaio consistiu, primeiramente, em adicionar em um erlenmeyer de 250 mL, o volume de 100 mL de solução salina 0,9% (0,9 g de sal marinho em 100 mL de água). Foram então inseridos os ovos de *Artemia sp*. Para a eclosão dos ovos de *Artemia sp* foi necessário mantê-los em uma estufa aquecida a 30 °C por um período de 48 h, com auxílio de injeção de ar comprimido (compressor de aquário) e ao abrigo da luz.

Para o ensaio de ecotoxicidade utilizando *Artemia sp*. como bioindicador, foram preparadas as amostras da seguinte forma:

- Na solução solubilizada foi adicionado sal marinho em uma concentração de 0,9%, em todas as amostras;
- Para cada amostra foi transferido 3 mL para o poço da placa;
- Dez indivíduos de *Artemia sp*. foram adicionados nos poços das placas, com o auxílio de uma pipeta;
- As placas foram armazenadas ao abrigo da luz, no escuro, em temperatura ambiente;
- Passado o período de 24 h foi realizado a contagem do número de indivíduos sobreviventes em cada poço, com a auxílio de microscópio.

3.2.1.4 Granulométrica

A Resolução CONAMA 454/2012 cita em seu Art. 6º que a caracterização física do material a ser dragado será expressa pelo seu volume e classificação granulométrica, realizada de acordo com a 1ª Etapa do Item 2 do Anexo desta Resolução. A classificação granulométrica deverá ser realizada comparando os resultados obtidos na

análise granulométrica com os valores da Tabela II do Anexo, disponível na Tabela 3.

Com isso, os sedimentos originários dos quatro (4) pontos, foram segregados para verificação do teor de cada fração existe em cada ponto. Primeiramente cada amostragem foi desidratado em estufa ($60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), e posteriormente, com classificação de acordo com a Resolução CONAMA 454/2012, e passadas pelas seguintes peneiras: 10, 16, 32, 60, 115, 250 e 500 mesh, ficando então divididos em 7 diferentes frações: Areia muito grossa, Areia grossa, Areia média, Areia fina, Areia muito fina, Silte e Argila.

Tabela 3 - Classificação dos sedimentos como referência a Escala Granulométrica de Wentworth, (1922).

Classificação	mm
Areia muito grossa	2 a 1
Areia grossa	1 a 0,5
Areia média	0,5 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,125
Areia muito fina	0,125 a 0,062
Silte	0,062 a 0,00394
Argila	0,00394 a 0,0002

Fonte: CONAMA 454 (2012).

3.2.2 Potencialidade

Considerando a necessidade de avaliar a viabilidade de uso desse material que está em forma de sedimento, é crucial a sua caracterização para obtenção da sua composição química, mineralógica e térmica. Sendo assim, foi realizado nas quatro (4) amostras coletadas uma série de ensaios.

A determinação da análise química quantitativa das amostras estudadas foi realizada pelo método de espectrometria de fluorescência de raio-X (FRX) em um Espectrômetro Epsilon 3^{XLE} Panalytical, com pastilha fundida. O intuito é verificar quimicamente a característica das diferentes frações, e avaliar possíveis contaminantes, que podem ser observados por essa técnica.

Os óxidos dos elementos químicos, em sua forma mais estável foram investigados por meio da caracterização mineralógica nas diferentes frações, determinadas pela técnica de difração de raio-X (DRX), em um difratômetro (Bruker, D-5000), radiação incidente Cu K α

($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), com aceleração de 40 kV e 30 mA, intervalo 2θ de 2 a 72° , velocidade de $2^\circ/\text{min}$. Essa técnica visa identificar a presença dos diferentes minerais dentro das frações segregadas. A quantificação das fases foi obtida por refinamento Rietveld (Rietveld, 1969), e as cartas selecionadas de *Powder Diffraction File* (PDF).

Com o intuito de avaliar o comportamento térmico das amostras, foi realizada análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) em um analisador simultâneo (TA Instruments, modelo SDT Q600). Os ensaios foram conduzidos com taxa de aquecimento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$, desde a temperatura ambiente até $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, nas frações estudadas, sob atmosfera de ar sintético.

3.2.3 Quantidade/ viabilidade

Para quantificar o material sedimentado ao longo do rio Urussanga, este estudo baseou-se nas informações disponíveis no EIA/RIMA e, principalmente, no Projeto Executivo de Desassoreamento elaborado em 2014. Na época, a estimativa de volume de sedimentos foi obtida por meio de levantamento dos bancos sedimentares com medições *in loco* e topografia nas áreas onde o leito rochoso estava exposto, tanto no fundo quanto nas margens do rio, especificamente no trecho 1. Nos demais trechos, a quantificação foi realizada por meio de sondagens rotativas executadas nas margens do rio. Foram realizadas cinco sondagens geotécnicas nas margens do rio Urussanga ao longo do seu curso visando auxiliar na definição da espessura de remoção de sedimentos. No trecho 1, praticamente todo o fundo do rio é rocha exposta, sendo os sedimentos compostos por seixos rolado e areia, dispostos em bancos, distribuídos ao longo do trecho. A partir da estaca 22, o banco de sedimento é mais profundo de que a altura prevista para remoção, conforme revelado pelos furos de sonda citados anteriormente, que além da remoção de material visando adequar a seção transversal do rio ao dimensionamento, que foi calculado baseado num tempo de retorno de 10 anos.

Para dragagem do rio Urussanga, a remoção dos sedimentos foi prevista de três modos, com a utilização de escavadeira hidráulica, draga de arraste (dragline) e outra por draga de sucção e recalque. Seus volumes estimados estão disponíveis na Tabela 4.

Para uma avaliação mais precisa, é necessária a reanálise do volume de sedimentos, considerando que, ao longo de 10 anos, o rio apresentou intensa dinâmica sedimentar, com remobilização, deposição e redistribuição contínua dos materiais ao longo do seu curso.

Tabela 4 - Levantamento estimado em 2014 no EIA do volume de sedimentos a serem removidos por trecho estudado.

Trecho	Estaca	Método de Remoção de sedimento	Volume a ser dragado (m³)
1	0 a 21+453,026	Escavadeira hidráulica	100.653,47
2	21+453,026 a 40+64,663	Dragline	399.541,67
3	40+64,663 a 59+391,432	Dragline	621.911,70
4	59+391,432 a 83 a 87+139,575	Dragline Sucção	1.123.209,82 191.097,75

Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

3.2.4 Aplicabilidade

Após a caracterização do material, avaliou-se a aplicabilidade do uso das frações em indústrias ou serviços na região. Os municípios que compõem a BHRU têm forte influência no setor de cerâmica vermelha de Santa Catarina, o APL de cerâmica vermelha da região tem grande capacidade de absorver uma série de materiais alternativos no seu processo, devido ao grande volume de matéria-prima utilizada. A utilização de resíduos como parte integradora da massa de cerâmica vermelha, faz com que o setor auxilie no desenvolvimento sustentável, minimizando o consumo de matéria prima bruta e promovendo a circularidade mineral, sendo as frações de sedimento analisadas um possível material a ser utilizado no setor minero-cerâmico da região caso possuam características atrativas.

Além no setor minero-cerâmico o material também pode ter aplicabilidade na confecção de artefatos de cimento e na estruturação de bases para pavimentação de estradas, todas atividades existentes nas proximidades do rio Urussanga. O uso de sedimentos removidos podem ser aproveitados em diferentes atividades, acarretando a redução de gastos e valorização do material dragado (Heinrich *et al.*, 2015; Liu; Xu; Li, 2017).

A aplicabilidade de sedimentos dragados na construção civil encontra respaldo em regulamentações técnicas e ambientais que definem critérios para sua utilização segura. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 454/2012 estabelece diretrizes para a disposição e o aproveitamento de

material dragado, incluindo sua possível destinação como insumo em obras. Normas específicas, como a NBR 15115 (ABNT, 2004e) e NBR 15116 (ABNT, 2021), regulamentam o emprego de resíduos em camadas de pavimentação e em concretos sem função estrutural, exigindo controle granulométrico e ensaios de resistência. Assim, o atendimento a esses requisitos normativos viabiliza o aproveitamento dos sedimentos dragados como matéria-prima, alinhando-se a princípios de sustentabilidade e economia circular.

Com intuito de verificar a possibilidade de emprego do sedimento em matriz cerâmica, realizou-se a ceramização, para análise ambiental após queima. Para preparação das amostras, cada uma delas foram secas em estufa (com fluxo de ar, marca DeLeo), à $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Após secas, entorno de 500 g de cada ponto amostral passaram por moagem (moinho de porcelana), por 5 min com intuito de desagregar os blocos maiores.

Finalmente, corpos de prova foram feitos, para avaliação do seu comportamento ambiental pós queima. Consistiu em inicialmente umidificar o pó (7% umidade), granular para homogeneização da umidade, e pelo método de prensagem (460 kgf/cm^2), 8 corpos de prova de $50 \times 50 \times 4\text{ mm}^3$ para cada amostra foram feitos.

Após prensados, as amostras foram secas em estufa (com resistência elétrica, DeLeo nº 2211, Tipo 8) à $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. Removida a umidade, os corpos de prova foram queimados em forno mufla (Jung J200) a $1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$, com taxa de aquecimento de $1,5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ e tempo de queima de 20 min. As amostras pós queimam podem ser vistos na Figura 9.

Figura 9 - Imagens dos corpos cerâmicos pós queima preparados apenas com os sedimentos estudados.



Fonte: Autora (2025).

Para avaliar a eficácia do processo de ceramização na redução de contaminantes nos sedimentos, foram conduzidos ensaios comparativos antes e após a queima. Inicialmente, os sedimentos brutos foram caracterizados segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004a), com

determinação de elementos presentes, como descrito na seção 3.2.1.1 Classificação ambiental. Em seguida, os corpos de prova confeccionados e submetidos a processo de sinterização promovem a transformação em estruturas cerâmicas densas. Após a queima, os corpos de prova foram novamente submetidos à classificação conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a) para verificar a concentração de metais pesados que excederam no sedimento bruto. Espera-se, com base em estudos prévios, que a ceramização imobilize de forma eficaz esses elementos, por meio do encapsulamento em fases vítreas ou aluminosilicatadas (Chen *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023), reduzindo sua lixiviação e solubilização por meio de transformações termodinâmicas estáveis. Dessa forma, os resultados pós-queima possibilitarão avaliar se o tratamento térmico pode ser adotado como estratégia de gerenciamento e posterior uso de resíduos fluviais contaminados, inclusive na indústria da cerâmica vermelha.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CLASSIFICAÇÃO

4.1.1 Classificação ambiental

Como início da análise dos sedimentos, houve a sua classificação conforme NBR 10.004:2004, para fins de apreciação em relação sua reação ambiental, visto que por última opção, o sedimento de desassoreamento pode ser considerado um resíduo sólido a ser descartado, em observância à Norma Técnica NBR 10.004 (ABNT, 2004). Nesse caso, a lixiviação de metais presentes precisa ser avaliada para verificar seus potenciais danos ao meio ambiente e à saúde pública.

A amostra do PU1 apresentou aspecto arenoso, de coloração marrom e odor metálico, possuindo uma densidade de $1,5\text{g/cm}^3$. A amostra do PU2, possui o mesmo aspecto arenoso, com coloração marrom amarelado, porém, sem odor e densidade de $1,8\text{g/cm}^3$. Já a amostra PU03 possui o aspecto de lodo com coloração cinza escuro e odor de matéria orgânica, com densidade de $1,9\text{g/cm}^3$. A amostra PU4 possui aspecto de lodo com coloração preta e odor de matéria orgânica, com densidade de $1,6\text{g/cm}^3$.

Referente aos critérios de corrosividade, todos os 4 pontos foram classificados como não corrosivo, pois apresentaram pH entre 3,07 e 7,5, como pode ser observado na Tabela 5, em sua mistura com água na proporção de 1:1 em peso, não ultrapassando o limite estabelecido de 2,1 a 12,4 pela norma ABNT NBR 10004:2004, letra A do item 4.2.1.2 Corrosividade. Portanto, todos os sedimentos analisados como resíduo foram classificados como não perigoso neste ensaio.

Analisando o critério reatividade, todas as amostras ensaiadas apresentaram ser não reativas, já que não apresentam em sua constituição íons cianeto e sulfeto (ácido sulfídrico) acima dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 10004:2004 (250 mg/Kg de HCN e 500 mg/Kg de H₂S), letra E do item 4.2.1.3 Reatividade. Portanto, todos os resíduos foram classificados como não perigosos neste ensaio.

Para o resultado de toxicidade, as amostras passaram por ensaio de lixiviação, onde os parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a ABNT NBR 10005:2004, não apresentam concentrações acima dos limites máximos permitidos do item 4.2.1.4 toxicidade, letra A, anexo F da norma ABNT NBR 10004:2004, caracterizando todos os quatro pontos avaliados como resíduos não tóxicos, sendo classificados como não perigosos – classe II neste ensaio.

Na Tabela 5 está disponível os resultados de cada parâmetro avaliado de acordo com os ensaios de solubilização e lixiviação, onde a maioria está abaixo do limite de detecção da metodologia aplicada para determinação de resultados.

Tabela 5 - Resultados da classificação dos quatro pontos de estudo, destacando em vermelho os acima do limite da norma referência.

Parâmetro	PU1	PU2	PU3	PU4	Limite
pH (1:1)	3,08	3,77	3,07	7,5	2,1 a 12,4
H ₂ S (mg/Kg)	<1,6	<1,6	<1,6	<1,6	500mg
HCN (mg/Kg)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	250mg
Arsênio (l) (mg/L)	0,105	<0,001	<0,001	<0,001	1,0
Bário (l) (mg/L)	<0,001	<0,001	0,21	0,24	70,0
Cádmio (l) (mg/L)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,5
Chumbo (l) (mg/L)	<0,001	0,02	<0,001	<0,001	1,0
Cromo total (l) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	5,0
Fluoreto (l) (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	150,0
Mercúrio (l) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,1
Prata (l) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	5,0
Selênio (l) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0
Benzeno (l) (µg/L)	<2,00	<2,00	<2,00	<2,00	2,0
Sólidos suspensão (%)	ND	ND	ND	ND	-
Sólidos secos (%)	71,64	75,38	66,54	22,10	-
Alumínio (s) (mg/L)	2,83	1,46	0,55	3,20	0,20
Arsênio (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Bário (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	0,042	0,056	0,7
Cádmio (s) (mg/L)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,005
Chumbo (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Cobre (s) (mg/L)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	2,0
Cromo total (s) (mg/L)	<0,001	0,028	<0,001	<0,001	0,05
Ferro (s) (mg/L)	4,20	0,46	8,96	21,91	0,30
Manganês (s) (mg/L)	1,11	0,15	0,55	0,43	0,10
Mercúrio (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001
Prata (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,05
Selênio (s) (mg/L)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,01
Sódio (s) (mg/L)	16,24	2,95	0,65	13,00	200,0
Zinco (s) (mg/L)	0,08	<0,01	0,03	0,02	5,0
Surfactantes (s) (mg/L)	<0,01	<0,10	<0,10	0,11	0,5
Sulfatos (s) (mg/L)	47	25	112	131	250
Nitrato (s) (mg/L)	<0,01	<0,10	0,14	0,18	10,0
Fenóis (s) (mg/L)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,01
Fluoretos (s) (mg/L)	<0,1	<0,1	<0,1	1,1	1,5
Cloretos (s) (mg/L)	46,50	25,03	111,50	131,40	250,0

(s) solubilizado; (l) lixiviado; ND Amostra não apresenta sólidos suspensos

Fonte: Autora (2024).

Considerando o ensaio de solubilização, dos parâmetros analisados no extrato do resíduo obtido segundo a ABNT NBR 10006:2004, todos os quatro pontos amostrados apresentam os parâmetros Alumínio, Ferro e Manganês com concentrações acima (0,20 mg/L, 0,30 mg/L e 0,10 mg/L respectivamente) dos limites máximos permitidos para o ensaio de solubilização do anexo G da ABNT NBR 10004:2004, caracterizando os resíduos como não inerte neste ensaio e classificando-o como não perigoso – classe II A – não inerte.

Considerando que este material não consta nos anexos A ou B da ABNT NBR 10004:2004, que não é inflamável em nenhuma amostra analisada, e que os resultados obtidos no decorrer dos ensaios da massa bruta, lixiviação, solubilização e das características físico-químicas do resíduo, todos os pontos de amostragem foram classificados como Não Perigoso – Classe II A – Não Inerte segundo a norma ABNT NBR 10004:2004, nos parâmetros analisados.

4.1.2 Análise química ambiental

Avaliando os resultados apresentados nas Tabela 6 e Tabela 7, pode-se perceber que a estação PU1 localiza-se em ambiente oxidante e apresenta valores de pH baixos, característico de áreas impactadas pela mineração de carvão. O fato da salinidade do ponto PU1 ser maior que as estações PU2 e PU3 devem também às atividades relacionadas à mineração de carvão, uma vez que elevadas concentrações de sulfatos interferem positivamente no resultado de salinidade. Pode-se perceber que embora dez anos tenham passado entre uma coleta e outra, o valor de pH ainda se mantém próximos.

Os pontos amostrados na porção mais alta do rio Urussanga (PU1) e na porção intermediária do canal (PU2 e PU3), apresentaram condições típicas de ambiente de água doce, enquanto a estação localizada no baixo rio Urussanga (PU4) apresenta condições típicas de água salobra em 2014, que embora tenha diminuído de 11,6 para 1,9% em 2024, ainda assim é considerada elevada.

O sistema de classificação da água de acordo com o estabelecido pela Resolução do CONAMA nº 357 (CONAMA, 2005), em seu Art 2º, adota as definições de águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰; águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰ e águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30‰.

Tabela 6 - Características da água intersticial dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2014.

Parâmetros	PU1	PU2	PU3	PU4
pH	3,7	5,9	5,7	6,6
Potencial de Oxirredução (mV)	316,8	-177,9	91,5	-143
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	2,8	2,1	0,5	0,4
Salinidade (%)	0,5	0,2	0,3	11,6

Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

Tabela 7 - Características da água intersticial dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2024

Parâmetros	PU1	PU2	PU3	PU4
pH	3,3	3,9	6,2	6,7
Potencial de Oxirredução (mV)	394,2	113,6	-47,3	-48,5
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	4,7	2,2	1,2	0,8
Salinidade (%)	0,2	0,1	0,4	1,9

Fonte: Autora (2024).

Ao longo dos anos de diferença entre uma amostragem e outra, pode-se perceber uma leve melhora do parâmetro Oxigênio Dissolvido, porém, ainda abaixo do recomendado para a preservação da vida aquática conforme Resolução CONAMA 357/05, que são no mínimo 5,0mg/L, o que não ocorre com o pH, que se mantém semelhante em cada ponto monitorado. A elevada variação da salinidade nas duas campanhas reflete a forte influência marinha na barra do rio, em 2014, favorecida por baixa vazão fluvial e maior penetração da cunha salina, obteve-se maior salinidade, já na segunda campanha, em 2024, valores inferiores a 2% indicam maior aporte de água doce, que limitou a intrusão marinha no ponto de desembocadura. Essa variação evidencia a dinâmica estuarina controlada pelo balanço entre descarga fluvial e ação das marés (Silvestrini; D'Aquino, 2020).

Avaliando os resultados químicos (Tabela 8 e Tabela 9), percebe-se uma melhora em relação as campanhas realizadas em 2014 e em 2024. Levando em consideração esse período, houve uma redução significativa no parâmetro Arsênio, único parâmetro que conforme a Resolução CONAMA N° 344 (CONAMA, 2004), foi considerado acima do limite estabelecido para sedimentos de água doce 1, o qual prevê baixa probabilidade de efeitos adversos a biota.

O arsênio está presente tanto em compostos orgânicos quanto inorgânicos, sendo os minerais sulfetados os mais comuns, como a

arsenopirita (FeAsS), o realgar (AsS), a enargita (Cu₃AsS₄) e, frequentemente, como impureza na pirita (FeS₂). Entre as fontes naturais de contaminação, destacam-se os minerais e rochas que contêm arsênio, bem como os solos e sedimentos derivados dessas formações geológicas.

Já entre as fontes antropogênicas, merecem atenção o uso de arsênio na preservação de madeira, a atividade mineradora, o refino de minerais não ferrosos e a queima de carvão com alto teor de arsênio. Essas práticas são comuns ao longo da bacia hidrográfica do rio Urussanga, onde também se encontram áreas com depósitos de rejeitos que ainda não foram totalmente recuperados — uma possível explicação para as altas concentrações desse elemento na região.

Os sulfetos presentes nessas pilhas de rejeito passam por processos de oxidação, tanto orgânicos quanto inorgânicos, liberando o arsênio. Esse elemento pode, então, formar novos minerais ou dissolver-se em águas superficiais e subterrâneas, originando arsenato e arsenito.

Também as concentrações de matéria orgânica e nutrientes (nitrogênio e fósforo) nas quatro estações amostrais encontram-se em conformidade com os valores considerados pela Resolução CONAMA nº 344/2004 como capazes de causar eutrofização em ambientes aquáticos.

Tabela 8 - Características químicas dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2014.

Parâmetros	PU1	PU2	PU3	PU4
Alumínio (mg/kg)	6.543	10.187	7.415	36.787
Arsênio (mg/kg)	6,2	4,1	4,2	6
Cádmio (mg/kg)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Chumbo (mg/kg)	10,4	9,4	4,8	26,9
Cobre (mg/kg)	15	11	15	34
Cromo (mg/kg)	15	18,7	21	32
Ferro (mg/kg)	41.653	31.622	50.041	51.526
Manganês (mg/kg)	55	71	49	154
Mercúrio (mg/kg)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Níquel (mg/kg)	1,9	2	1,3	5,9
Zinco (mg/kg)	18	28	28	136
Nitrogênio (mg/kg)	ND	ND	ND	2700
Fósforo (mg/kg)	175	ND	655	961
Matéria Orgânica (%)	3,9	4,3	2,8	8,6

ND. Não detectado

Fonte: IPAT/UNESC, (2014).

Tabela 9 - Características químicas dos sedimentos do rio Urussanga obtida no monitoramento de 2024

Parâmetros	PU1	PU2	PU3	PU4
Alumínio (mg/kg)	4.650,99	4.380,21	10.441,39	18.550,53
Arsênio (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cádmio (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Chumbo (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Cobre (mg/kg)	104,45	132,472	129,646	122,649
Cromo (mg/kg)	28,64	29,52	31,02	37,09
Ferro (mg/kg)	4.979,43	7.711,99	10.418,39	14.512,12
Manganês (mg/kg)	44,904	<0,1	53,586	92,447
Mercúrio (mg/kg)	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Níquel (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Zinco (mg/kg)	5,55	4,31	6,96	16,04
Nitrogênio (mg/kg)	ND	ND	0,11	0,81
Fósforo (mg/kg)	78,320	104,357	143,221	239,010
Matéria Orgânica (%)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

ND. Não detectado

Fonte: Autora (2024).

Avaliando os parâmetros nas amostragens citadas nas Tabela 8 e Tabela 9, observa-se uma leve melhora entre os períodos avaliados. Em 2014, a referência utilizada para avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras era a Resolução CONAMA 344/2004, o qual foi revogado pela Resolução CONAMA 454/2012, que foi utilizado neste estudo para fins de análise da legislação.

A redução dos teores de fósforo observada entre as duas campanhas de amostragem do sedimento pode ser atribuída à dinâmica natural do sistema fluvial, especialmente às variações hidrológicas e geoquímicas. Alterações na vazão do rio, associadas a eventos de precipitação, podem promover a diluição do fósforo no sedimento ou sua remobilização para a coluna d'água. Além disso, o fósforo apresenta forte afinidade com frações finas do sedimento, como argilominerais e matéria orgânica, de modo que mudanças na granulometria ou no teor de material orgânico influenciam diretamente sua concentração. Variações nas condições de pH e potencial redox também podem favorecer a liberação do fósforo previamente adsorvido a óxidos de ferro e manganês, reduzindo seus teores no sedimento sólido (House; Denison, 2002; Søndergaard; Jensen; Jeppesen, 2003).

As quatro estações amostrais avaliados na primeira campanha em 2014 apresentaram valores de Ferro acima do valor recomendado por

Thomas (1987 *apud* Campagna, 2005) para sedimento altamente poluído, e para Manganês é típica para sedimento não poluído. Já na campanha realizada em 2024, os índices de Ferro foram reduzidos em média 79%, classificando o sedimento como não poluído para os dois parâmetros (<17.000 mg/kg para Ferro e <300 mg/kg para Manganês), como observado na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparativo dos parâmetros de ferro e manganês, nas campanhas de 2014 e 2024, nos diferentes pontos amostrais.

Parâmetros		PU1	PU2	PU3	PU4
Ferro	2014	41.653	31.622	50.041	51.526
	2024	4.979	7.712	10.418	14.512
Manganês	2014	55	71	49	154
	2024	45	<0,1	54	92

Fonte: Autora (2024).

Com base nesses dados, compreende-se que houve uma minimização da influência exercida pela mineração nesse intervalo de tempo, ocasionada muito provavelmente pela minimização ou encerramento da deposição de carvão no leito do rio.

4.1.3 Ecotoxicidade

No estudo apresentado em 2014, foi realizado ensaio de ecotoxicidade aguda nas quatro amostras compostas, utilizando *Daphnia magna* como bioindicador. Na campanha das quatro estações amostrais apresentaram Fator de Diluição 4 (FD = 4), e mesmo com Arsênio estando em maior quantidade na estação PU1, este elemento não apresentou efeito adverso quanto à toxicidade aos organismos expostos, porém, pode-se observar que em 2024, o Fator de Diluição reduziu, apresentando um menor potencial de poluição para os bioindicadores comparados ao primeiro ano de monitoramento, conforme observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de toxicidade Aguda com *Daphnia magna* como bioindicador.

	Pontos amostrais			
	PU1	PU2	PU3	PU4
FDd 2014	4	4	4	4
FDd 2024	4	3	4	1

Fonte: Autora (2024).

Ensaio em água intersticial constituem maneira indireta de avaliar o potencial de toxicidade dos sedimentos e podem fornecer informações importantes sobre poluição de sedimentos. Entretanto, esses ensaios podem tanto subestimar quanto superestimar a toxicidade dos sedimentos devido a algumas limitações: ensaio com água intersticial são pouco realistas do ponto de vista químico e biológico, água intersticial pode não ser a única rota de exposição, a sensibilidade do ensaio pode ser prejudicada devido a manipulações de laboratório, muitos organismos bentônicos não são influenciados por água intersticial (Chapman *et al.*, 2002).

O ensaio de ecotoxicidade em *Allium cepa* traz uma série de resultados referentes ao comportamento do crescimento das raízes no contato com os sedimentos estudados. A Tabela 12 é possível observar o comportamento médio para número, massa (g) e tamanho (mm) de raízes para cada ponto, em diferentes teores.

Tabela 12 - Valores de ecotoxicidade em *Allium cepa*, ilustrando os valores de número de raízes, sua massa e comprimento.

Teores	Pontos amostrais				
	PU1	PU2	PU3	PU4	
N° raízes (unidades)	100%	21,3±6,4	63,0±37,2	32,0±7,2	17,0±11,0
	75%	27,3±10,7	43,3±13,1	18,6±6,4	36,0±16,5
	50%	54,7±11,7	41,3±25,7	29,3±9,0	36,7±18,9
	25%	44,7±18,6	40,3±10,3	25,3±10,7	23,7±13,6
	0%	53,3±6,5			
Massa (g)	100%	0,5±0,3	1,3±1,2	0,1±0,04	0,3±0,1
	75%	0,6±0,2	0,9±0,3	0,3±0,06	0,8±0,2
	50%	1,3±0,3	0,8±0,4	0,5±0,1	1,2±0,9
	25%	0,6±0,4	0,7±0,1	0,4±0,2	0,5±0,3
	0%	1,4±0,3			
Comprimento (mm)	100%	53,5±29,3	62,1±8,9	33,3±1,0	34,3±12,0
	75%	64,0±13,1	52,2±9,2	53,0±1,8	49,0±19,1
	50%	64,0±12,0	50,8±3,8	54,8±5,4	56,0±25,5
	25%	45,7±6,6	54,0±7,7	73,2±2,1	47,2±8,9
	0%	64,8±23,8			

Fonte: Autora (2025).

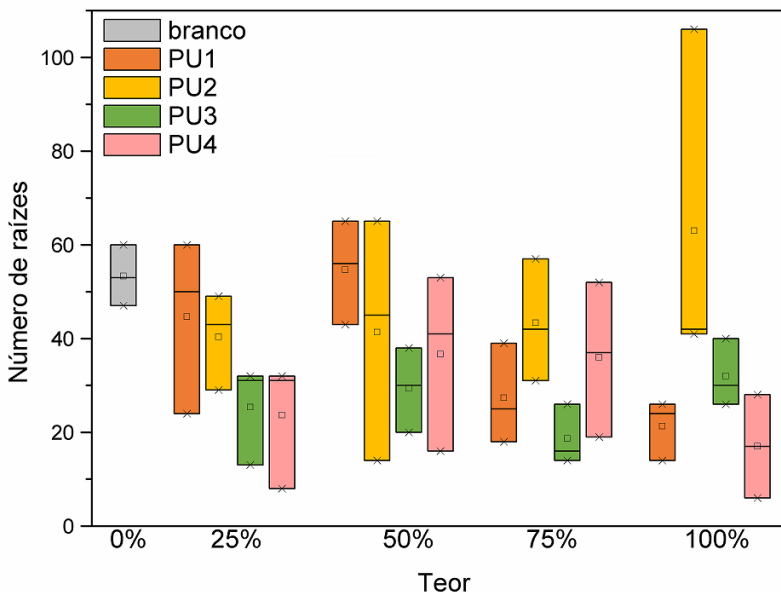
Os resultados ecotoxicológicos observados nos ensaios com *Allium cepa* (Tabela 12) podem ser diretamente associados às características químicas dos sedimentos apresentadas na Tabela 9.

Destacam-se os elevados teores de alumínio, ferro e manganês, especialmente nos pontos PU3 e PU4, que aumentam progressivamente no sentido jusante e são conhecidos por sua alta reatividade com argilominerais, podendo intensificar efeitos tóxicos sobre o desenvolvimento radicular. Além disso, os teores expressivos de fósforo e a presença de cobre, cromo e zinco, sobretudo em PU3 e PU4, indicam um ambiente geoquimicamente ativo, potencialmente impactado por aportes antrópicos associados à mineração de carvão. A combinação desses elementos, mesmo quando individualmente abaixo de limites críticos, pode gerar efeitos sinérgicos, refletidos na redução do número de raízes, massa e comprimento radicular observados nos bioensaios. Assim, os dados químicos corroboram os resultados biológicos, evidenciando que a composição elementar dos sedimentos exerce influência direta na toxicidade observada ao longo do trecho jusante do rio Urussanga. Com base nos resultados apresentados na Tabela 12, realizou-se os gráficos Boxplot para as diferentes medidas das raízes obtidas.

Para o número de raízes (Figura 10), observa-se que o branco (0%) apresenta um agrupamento em torno de 50–60 raízes, sem grande dispersão, e tendo um crescimento saudável. Quando analisado os teores de 25% a 100% da solução de cada um dos pontos, observa-se que as caixas tendem a baixar gradualmente, indicando inibição no crescimento conforme aumenta a concentração. É preciso destacar que PU2 em 100% mostra um outlier extremo (valor 106), gerando uma distorção visual, sendo uma condição atípica. PU4 mostra dispersão maior e medianas mais baixas, especialmente em 75% e 100%, sugerindo efeito tóxico mais intenso.

Com base no número de raízes, realizou-se o cálculo da inibição percentual do crescimento da raiz (IPCR), cujos valores são apresentados na Tabela 13. Os resultados evidenciam variações consideráveis entre os pontos amostrais. Os pontos PU1, PU3 e PU4 demonstraram comportamento típico de toxicidade, com aumento da inibição conforme o aumento da concentração da amostra. Destaca-se PU4, que apresentou IPCR superior a 68% na concentração de 100%. Em contrapartida, PU2 apresentou comportamento atípico, com resposta estimulante do crescimento na concentração máxima, sugerindo possível efeito hormético ou variabilidade experimental. De modo geral, os dados indicam potencial efeito tóxico das amostras, especialmente em concentrações acima de 50%.

Figura 10 - Boxplot do número de raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.



Fonte: Autora (2025).

Tabela 13 - Valores obtidos pelo cálculo da inibição percentual do crescimento da raiz (IPCR) nos diferentes pontos amostrais.

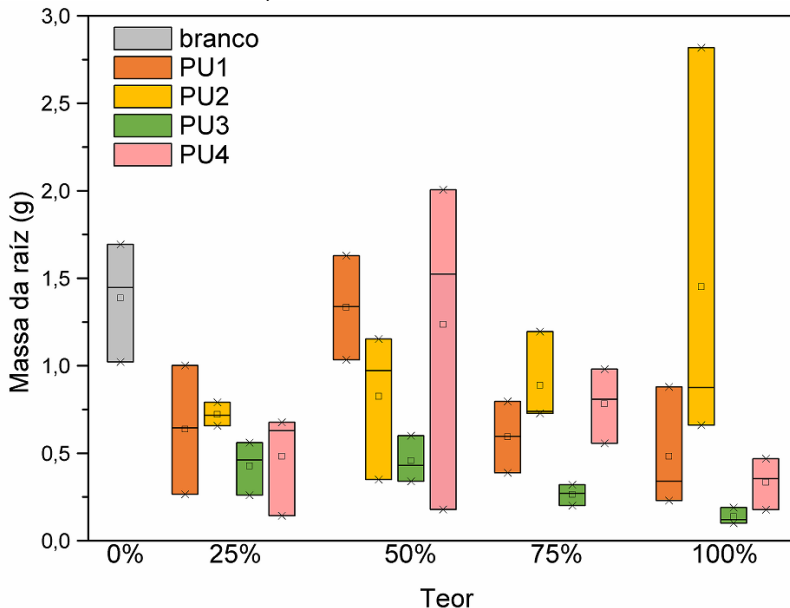
Teores	Pontos amostrais			
	PU1	PU2	PU3	PU4
100%	60,00%	-18,13%	40,00%	68,13%
75%	48,75%	18,75%	65,00%	32,5%
50%	-2,50%	22,50%	45,00%	31,25%
25%	16,25%	24,38%	16,25%	55,63%

Fonte: Autora (2025).

A análise da biomassa radicular (Figura 11) evidenciou uma redução progressiva da massa das raízes com o aumento do teor das amostras, indicando um efeito dose-dependente característico da toxicidade. Os pontos amostrais PU3 e PU4 apresentaram os menores valores de biomassa em praticamente todos os teores testados, sugerindo maior toxicidade. O controle apresentou desenvolvimento radicular superior e consistente, servindo como referência para comparação. PU1 e PU2 demonstraram respostas intermediárias, com PU2 exibindo maior

variabilidade, possivelmente atribuída à heterogeneidade do material ou à presença de substâncias com efeitos estimulantes em baixas concentrações. Esses resultados reforçam a sensibilidade da cebola como bioindicador e a relevância da avaliação ecotoxicológica para caracterização dos sedimentos.

Figura 11 - Boxplot da massa das raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.

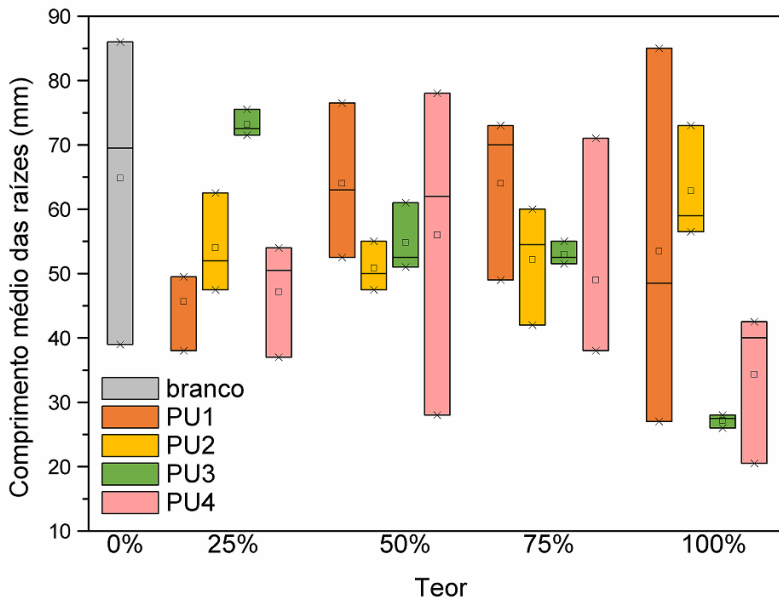


Fonte: Autora (2025).

O comprimento médio das raízes (Figura 12) foi progressivamente reduzido com o aumento do teor da amostra, evidenciando um efeito tóxico dependente da concentração. O branco apresentou crescimento expressivo das raízes (~70 mm), enquanto todos os pontos amostrais demonstraram maior inibição, mesmo em concentrações de 25%, com exceção de alguns casos isolados. A resposta dos pontos PU1 e PU2 foi mais estável em concentrações intermediárias, mas também sofreram redução em teores mais elevados. A grande variabilidade observada especialmente em PU4 pode estar associada à heterogeneidade dos resíduos ou à presença de compostos com efeitos horméticos. Os

resultados reforçam a sensibilidade do comprimento radicular como indicador de toxicidade em bioensaios com *Allium cepa*.

Figura 12 - Boxplot do comprimento médio das raízes de cebola por ponto amostral, de acordo com a concentração do sedimento na amostra.



Fonte: Autora (2025).

A avaliação da toxicidade aguda por meio da taxa de mortalidade média de *Artemia salina* revelou diferenças significativas entre os pontos amostrais analisados (Tabela 14). Os dados demonstram que os pontos PU1 e PU3 apresentaram elevada toxicidade, com mortalidade de 100% já nas concentrações de 100%, e 86,7% e 100% nas concentrações de 75%, respectivamente, evidenciando uma forte resposta dose-dependente. O ponto PU2 apresentou toxicidade moderada, com mortalidade de 30% a 100% e redução gradual nas concentrações menores. Em contraste, o ponto PU4 se destacou por apresentar os menores índices de mortalidade, com valores de 20% a 100% e 6,7% a 75%, sendo próximos à mortalidade observada no controle negativo (3,3%). Esses resultados indicam que os pontos PU1 e PU3 possuem substâncias potencialmente tóxicas em níveis críticos para a fauna aquática, enquanto PU4 demonstrou comportamento ambientalmente mais seguro.

Tabela 14 - Taxa de mortalidade média de *Artemia salina* nos diferentes pontos amostrais.

Teores	Taxa de mortalidade nos pontos amostrais			
	PU1	PU2	PU3	PU4
100%	100%	30,00%	100%	20%
75%	86,67%	33,33%	100%	6,67%
50%	43,33%	26,67%	46,67%	16,67%
25%	10,00%	20,00%	16,67%	13,33%
0%		3,33%		

Fonte: Autora (2025).

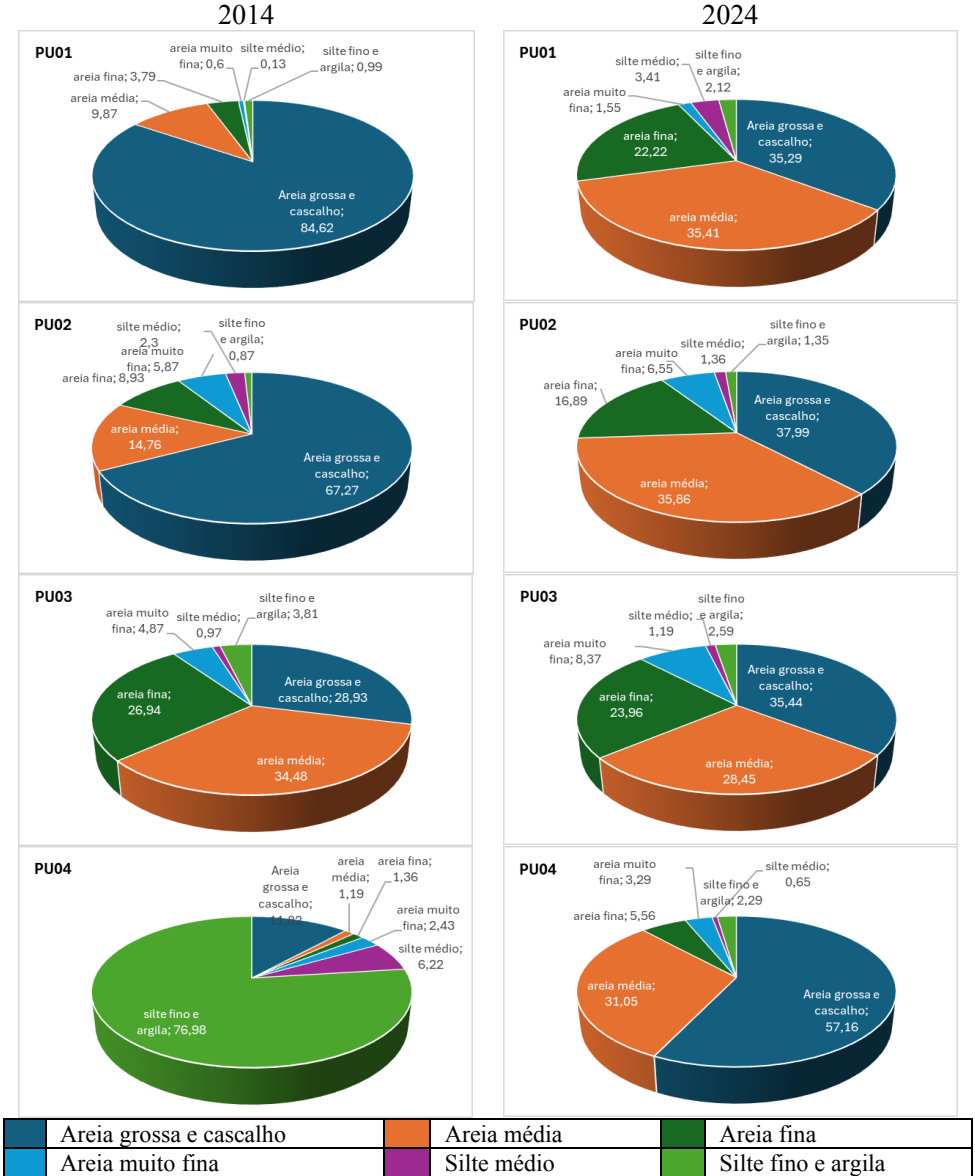
4.1.4 Granulométrica

A classificação dos sedimentos baseado na Escala Granulométrica de Wentworth, (1922), ilustrados nos gráficos da Figura 13 apresenta uma alteração granulométrica no passar dos anos na distribuição das frações, especialmente entre areia fina, silte e argila.

Na campanha de 2014, predominavam as frações de areia grossa e média nos pontos localizados a montante (PU1 e PU2), com menor presença de frações finas como silte e argila. Já os pontos a jusante (PU3 e PU4) apresentavam maior proporção de frações finas, indicando uma tendência natural de deposição de partículas menores nos trechos finais do curso do rio. No entanto, a campanha de 2024 demonstrou um aumento da presença de frações finas mesmo nos pontos a montante, sugerindo um avanço no grau de assoreamento e uma maior degradação dos processos de contenção de sedimentos na bacia. Essa mudança pode estar associada ao aumento das atividades agrícolas e extrativas, à ausência de práticas conservacionistas nas margens e à intensificação de processos erosivos. Esse comportamento evidencia que o rio se encontra em constante atividade dinâmica, respondendo rapidamente a ações naturais e antrópicas ao longo do tempo. Alterações no uso do solo, eventos hidrológicos e processos erosivos influenciam diretamente a carga sedimentar e a composição mineralógica, favorecendo a entrada e o transporte de argilas, especialmente caulínicas, minerais mais recentes da crosta terrestre, que constituem a base das argilas da região estudada.

Essa mudança temporal no perfil granulométrico tem implicações diretas na aplicabilidade dos sedimentos. Frações mais grossas são, geralmente, mais favoráveis ao uso direto na construção civil (como base de concretos ou materiais cimentícios), enquanto as frações finas podem ser vantajosas para a produção cerâmica.

Figura 13 - Classificação granulométrica, obtido por peneiramento, através da Escala Granulométrica de Wentworth, (1922), da 1ª campanha em 2014, comparando com a coleta realizada em 2024.



Um destaque importante observado na campanha de 2024 foi o aumento das frações arenosas no ponto PU4. Esse ponto está localizado próximo à foz do rio, na região da Barra do Torneiro, onde o Urussanga deságua em ambiente costeiro. Essa área de transição hidrodinâmica favorece a deposição de partículas mais pesadas, como a areia, devido à redução da velocidade da corrente fluvial ao se aproximar do mar. Além disso, a influência de fluxos de maré e processos costeiros pode remobilizar partículas finas e manter as frações mais grossas depositadas no fundo. Esse comportamento é comum em regiões estuarinas ou de foz de rios e pode explicar a mudança no perfil granulométrico observada em PU4 ao longo do tempo.

Os dados reforçam a importância do monitoramento contínuo para garantir a gestão adequada dos sedimentos dragados, tanto em termos ambientais quanto tecnológicos. É importante destacar, que a coleta do material ocorreu de forma superficial (através da draga), e que é importante a analisar o perfil de todo material assoreado no leito do rio.

4.2 POTENCIALIDADE

4.2.1 Análise química

As características químicas dos pontos amostrais, apresentados na Tabela 15, ilustram majoritariamente a presença de sílica (SiO_2), que pode estar associado a presença de quartzo, principalmente nos pontos PU1, PU2 e PU3. A presença de alumina (Al_2O_3) por sua vez, quando ligados a SiO_2 , formam os aluminossilicatos, que podem ser divididos em hidratados (argilominerais) e anídeos (feldspatos) (Lira; Neves, 2013; Moreno-Maroto; Alonso-Azcárate, 2018). Os óxidos alcalinos ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$) e alcalino-terrosos ($\text{CaO}+\text{MgO}$), denominados como óxidos fundentes no uso em cerâmica (Lengler; Vicenzi; Bergmann, 2009; Riella; Franjndlich; Durazzo, 2002), e principalmente a presença desses óxidos, pode estar alinhados com a presença de feldspatos. O potássio em específico, mostrou que diminui entre os pontos PU1 e PU4. Já os óxidos cromóforos ($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$) empõem uma forte influência para fomento da coloração das peças cerâmicas (Mapuna *et al.*, 2023). Em específico o ferro é responsável pelos tons avermelhados no produto cerâmico, e o titânio por sua vez, é responsável pelos tons alaranjados (Freitas, 2013). Com relação ao ferro, pode estar diretamente ligado a influência da mineração do carvão e ao aporte antrópico de rejeitos que são ricos em ferro, e o aumento do teor entre PU1 e PU4, pode estar associado a reatividade dos argilominerais com o ferro.

Por fim, a perda ao fogo (P.F.) cujo teor está relacionado à desidroxilação dos argilominerais, à oxidação da matéria orgânica, à decomposição de carbonatos, sulfetos, hidróxidos, etc., o que nesse caso aumentou entre os pontos PU1 e PU4. Nesse sentido, houve a tendência de haver mais materiais anidros na nascente do rio, como quartzo e feldspatos, e argilominerais e matéria orgânica na foz.

Tabela 15 - Caracterização química obtido por FRX dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.

Materiais	Óxidos (%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Mn ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	P.F.
PU1	77,38	10,11	4,48	0,73	3,47	0,37	0,24	0,08	0,02	0,07	<0,05	3,01
PU2	77,28	7,75	2,45	0,57	5,26	0,43	0,19	0,08	0,01	0,09	<0,05	5,88
PU3	75,83	8,39	1,77	0,35	5,72	0,45	0,14	0,09	0,02	0,11	<0,05	7,10
PU4	59,58	11,92	1,58	0,56	9,39	0,47	0,30	0,37	0,02	0,19	<0,05	15,59

P.F.: Perda ao Fogo

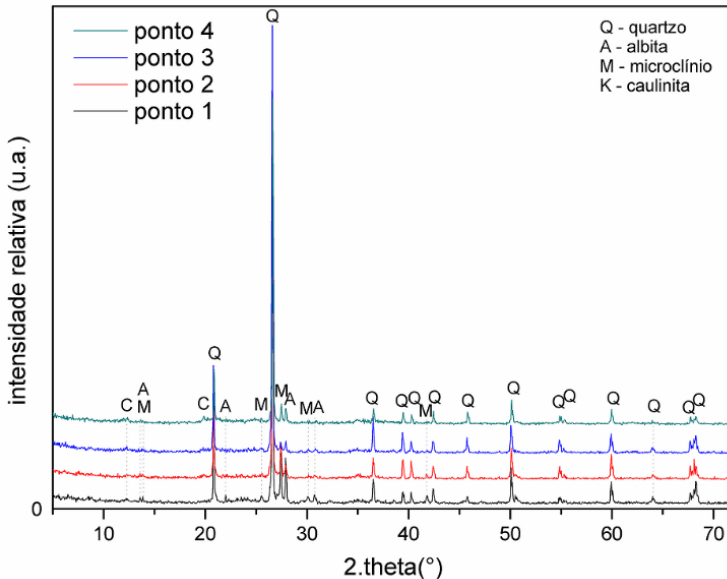
Fonte: Autora (2024).

4.2.2 Análise mineralógica

Os óxidos dos elementos químicos, apontados na análise de FRX (Tabela 15), em sua forma mais estável, estão presentes nas fases cristalinas (Figura 14). Observa-se a presença de quartzo (SiO₂ – cartão PDF n. 04-007-0522), como sugerido pela presença de óxidos fundentes, também observou-se a presença dos feldspatos como albita (NaAl₃Si₃O₈ - cartão PDF n. 00-009-0466) e microclínio (KAlSi₃O₈ - cartão PDF n. 00-022-0687). E também como sugerido na presença dos óxidos, observou-se a presença de argilominerais como a caulinita (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O – cartão PDF n. 00-014-0164).

A Tabela 16 por sua vez apresenta os teores de cada um dos minerais presente nos diferentes pontos. Observa-se que as quantias somadas de feldspatos iniciam em ~21% e majoritariamente quartzo (70%), ilustrando uma incidência muito possivelmente de saibro (rochas quartzo-feldspáticas), e baixo teor de argilominerais (caulinita ~ 7,5%). Aos demais pontos, é visível a diminuição dos feldspatos (13%, 9% e 7,5%) e o aumento de argilominerais (9,66%, 15,87% e 37,65%). O quartzo por sua vez tem uma leve crescente do PU1 para PU2 (70 para 77%), havendo uma estabilização no PU3 (75%) e diminuindo consideravelmente em PU4 (54,75%). É possível verificar que as maiores concentrações são de areia, mas há incidência de outras possibilidades minerais principalmente em PU1 (feldspatos) e PU4 (argilominerais).

Figura 14 - Difratogramas de raios-X dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.



Fonte: Autora (2024).

Tabela 16 - Quantitativo dos minerais dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais obtidos por Rietveld.

Mineral	Teor (%)			
	PU1	PU2	PU3	PU4
Quartzo	70,41	77,06	75,02	54,74
Microclínio	18,39	10,25	6,95	6,32
Albita	3,65	3,03	2,16	1,29
Caulinita	7,55	9,66	15,87	37,65

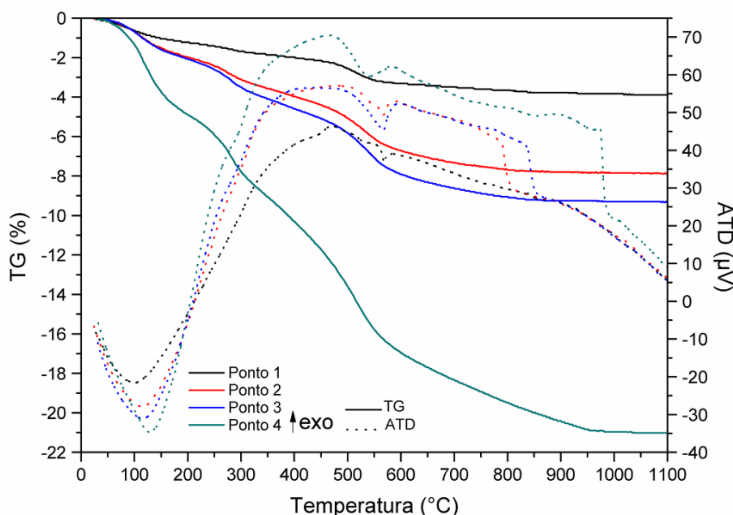
Fonte: Autora (2025).

É importante destacar, que a presença desses minerais, estão associados ao despejo industrial no rio e arrasto pluvial dos sedimentos às margens do rio. Uma vez no curso d'água, a corrente tende a carregar o material mais fino, deixando estes nos pontos mais próximos da foz, e os mais grosseiros a ficar nos pontos iniciais. Nesse sentido, quartzo e feldspatos são encontrados primeiro, já argilominerais e matéria orgânica mais no final.

4.2.3 Análise térmica

A análise térmica dos pontos amostrais (Figura 15) ilustra que até ~ 150 °C, houve uma leve perda de massa aos pontos PU1, PU2 e PU3 e mais acentuada para o ponto PU4, estando associada a umidade livre e adsorvida e evaporação da água fisicamente adsorvida nos poros e superfícies dos grãos (Acchar; Dultra; Segadães, 2013; Comin *et al.*, 2021; de Los Santos Valladares *et al.*, 2022).

Figura 15 - Análise térmica diferencial e termogravimétrica (ATD/TG) dos sedimentos nos diferentes pontos amostrais.



Fonte: Autora (2025).

Já entre 150 °C a ~ 300 °C, já acontece o início da perda de matéria orgânica volátil e degradação de compostos orgânicos leves presentes nos sedimentos (de Almeida *et al.*, 2003). Entre 400–650 °C ocorre a desidroxilação dos argilominerais (como caulinita) e liberação de hidroxilas estruturais (Findoráková *et al.*, 2015). A 573 °C o evento endotérmico pode estar associado a transformações de fases mineralógicas, como transição alotrópica do quartzo, α - β a 573 °C, mas sem perda de massa (Comin *et al.*, 2024). Finalmente, as amostras referente ao PU4, na região de 900-1000 °C, um pequeno pico exotérmico aparece devido à cristalização da mulita I (Manoharan *et al.*, 2011).

De modo geral, observa-se uma tendência de distribuição granulométrica e mineralógica ao longo do curso do rio, com maior concentração de materiais mais densos e de granulometria grossa nos trechos próximos à cabeceira. No ponto 1, predominam feldspatos e frações arenosas mais grosseiras, na forma de cascalhos e areia grossa, refletindo a maior competência de transporte nesses trechos iniciais.

Nos pontos 2 e 3, verifica-se um aumento progressivo do teor de areia quartzosa, acompanhado pela redução dos teores de feldspatos. Esse comportamento indica maior eficiência no transporte de partículas arenosas médias e finas, enquanto os feldspatos, de granulometria mais elevada, apresentam maior dificuldade de arraste.

Já no ponto 4, observa-se maior concentração de argilominerais, em função de sua menor granulometria e maior capacidade de transporte em suspensão. Essa tendência se intensifica no sentido jusante, culminando nos maiores teores na foz do rio. Associado a esse comportamento, verifica-se o aumento dos valores de perda ao fogo, relacionados tanto à presença de argilominerais quanto ao acúmulo de matéria orgânica transportada pela correnteza.

Destaca-se ainda o enriquecimento de elementos inorgânicos potencialmente contaminantes, como ferro, alumínio e manganês, nas proximidades da foz, fenômeno fortemente associado à elevada reatividade desses elementos com os argilominerais.

4.3 QUANTIDADE/ VIABILIDADE

Com base na granulometria e na quantidade de material que deve ser retirado por trecho, estima-se a quantidade de material que pode ser removida e posteriormente utilizada/valorizada, em m³ (Tabela 17):

Essas quantidades foram estimadas com base nas informações apresentadas no EIA de 2014 (Tabela 4) e indicam a viabilidade de uso dos sedimentos, considerando a presença de indústrias nas proximidades da região de extração, conforme ilustrado na Figura 16.

Considerando a dinâmica fluvial e os processos naturais de deposição, remobilização e transporte de sedimentos ao longo do tempo, é plausível que no cenário atual analisado, tais volumes tenham sofrido alterações. Conforme a disposição atual do material no leito do rio, parte dos sedimentos podem necessitar um processo de beneficiamento prévio à sua potencial aplicação ou comercialização. Esse beneficiamento compreende etapas de separação granulométrica, a fim de obtenção das frações de interesse. Deve-se, ainda, considerar a presença de concentrações elevadas de determinados elementos, como ferro (Fe) e

manganês (Mn), o que pode requerer avaliação técnica específica quanto à viabilidade ambiental e às restrições de uso, em conformidade com a legislação vigente.

Tabela 17 - Estimativa de quantidade de material a ser dragado com base na granulometria dos sedimentos.

2014				
Material (m ³)	PU1	PU2	PU3	PU4
Areia grossa e cascalho	85.172,97	268.771,68	179.919,05	155.351,15
areia média	9.934,50	58.972,35	214.435,15	15.640,26
areia fina	3.814,77	35.679,07	167.543,01	17.874,58
areia muito fina	603,92	23.453,10	30.287,10	31.937,67
silte médio	130,85	9.189,46	6.032,54	81.749,93
silte fino e argila	996,47	3.476,01	23.694,84	1.011.753,97
Total	100.653,47	399.541,67	621.911,70	1.314.307,57
2024				
Material (m ³)	PU1	PU2	PU3	PU4
Areia grossa e cascalho	35.520,61	151.785,88	220.405,51	751.258,21
areia média	35.641,39	143.275,64	176.933,88	408.092,50
areia fina	22.365,20	67.482,59	149.010,04	73.075,50
areia muito fina	1.560,13	26.169,98	52.054,01	43.240,72
silte médio	3.432,28	5.433,77	7.400,75	8.543,00
silte fino e argila	2.133,85	5.393,81	16.107,51	30.097,64
Total	100.653,47	399.541,67	621.911,70	1.314.307,57

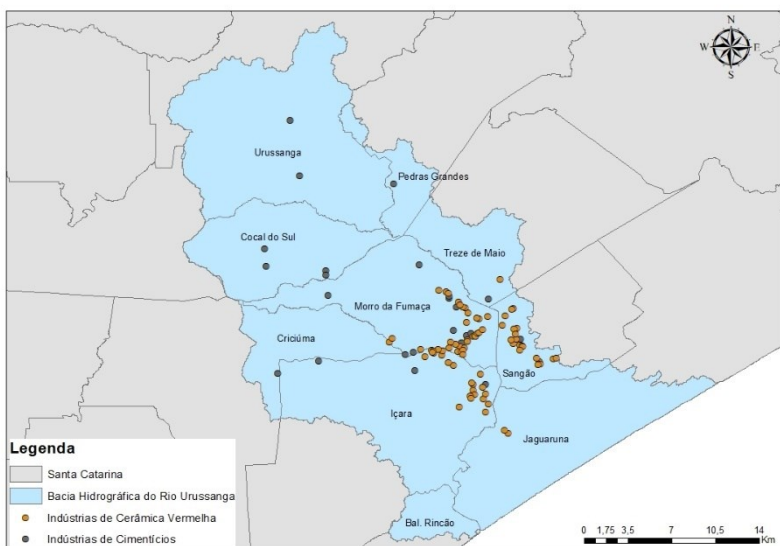
Fonte: Autora (2025).

É possível observar um *cluster* industrial tanto na área de cerâmica vermelha, como possível destino dos sedimentos argilosos, bem como de artefatos de cimentos, que podem ser abastecidos pelos sedimentos arenosos.

Salienta-se que os diferentes materiais transportados pelo rio podem ser aproveitados pela indústria local: frações argilosas e argilo-arenosas podem ser utilizadas na fabricação de cerâmicas para alvenaria, agregando valor a resíduos sedimentares (Mezencevova *et al.*, 2012; Samara; Lafhaj; Chapiseau, 2009). Por outro lado, sedimentos arenosos de variadas granulometrias podem servir como agregados para materiais

cimentícios. A substituição parcial da areia natural por areias alternativas pode influenciar propriedades de argamassas e concretos, como trabalhabilidade, resistência mecânica e redução de vazios (ex.: uso de areias alternativas em argamassas e concretos ajusta a distribuição de partículas e melhora o enchimento de vazios, afetando positivamente desempenho estrutural) (Beddaa *et al.*, 2020, 2023). Embora a literatura já aborde a utilização de areias de rios na construção civil (Dinh *et al.*, 2022; Rifa *et al.*, 2023).

Figura 16 - Imagem da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga com indicação das indústrias de cerâmica vermelha e de artefatos de cimento.



Fonte: Autora (2025).

4.4 APLICABILIDADE

Durante o ensaio de classificação conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004a), os sedimentos apresentaram concentrações de ferro no extrato solubilizado superiores ao limite estabelecido, com valores de 4,20 (PU1), 0,46 (PU2), 8,96 (PU3) e 21,91 mg/L (PU4). Entretanto, após o tratamento térmico por ceramização, os mesmos pontos apresentaram concentrações inferiores ao limite, indicando a eficácia do processo na imobilização do ferro, como pode ser observado na Tabela 18. Tal comportamento pode ser atribuído à formação de fases estáveis, que

apresentam baixa solubilidade, além do possível encapsulamento físico na matriz cerâmica. A oxidação de Fe^{2+} para Fe^{3+} durante a queima também pode ter contribuído para essa redução, visto que as formas oxidadas são menos móveis em meio aquoso (Xu; Zou; Li, 2009).

Da mesma forma observada para o ferro, os teores de alumínio e manganês no extrato solubilizado também apresentaram significativa redução após o tratamento térmico, ficando abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Tal comportamento pode ser atribuído à formação de fases termicamente estáveis, como aluminossilicatos no caso do alumínio (ex.: mullita), e espinélios no caso do manganês (ex.: MnFe_2O_4), que apresentam baixa solubilidade em meio aquoso. Além disso, a oxidação térmica de Mn^{2+} para formas superiores (Mn^{3+} ou Mn^{4+}) contribui para a diminuição de sua mobilidade. Por fim, o encapsulamento físico desses elementos na matriz cerâmica vítrea atua como barreira à lixiviação, reforçando a eficácia da ceramização como técnica de imobilização de poluentes (Jee; Kim; Park, 2024; Lin *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Tabela 18 - Comparativo dos parâmetros de alumínio, ferro e manganês, perante o ensaio de solubilização segundo ABNT NBR10.004:2004, nos diferentes pontos amostrais, no material bruto e após processo de ceramização.

Parâmetros (mg/L)		PU1	PU2	PU3	PU4	Limite
Alumínio	Bruto	2,83	1,46	0,55	3,20	0,2
	1.100°C	0,13	0,08	0,07	0,06	
Ferro	Bruto	4,20	0,46	8,96	21,91	0,3
	1.100°C	0,11	0,13	0,25	0,11	
Manganês	Bruto	1,11	0,15	0,55	0,43	0,1
	1.100°C	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	

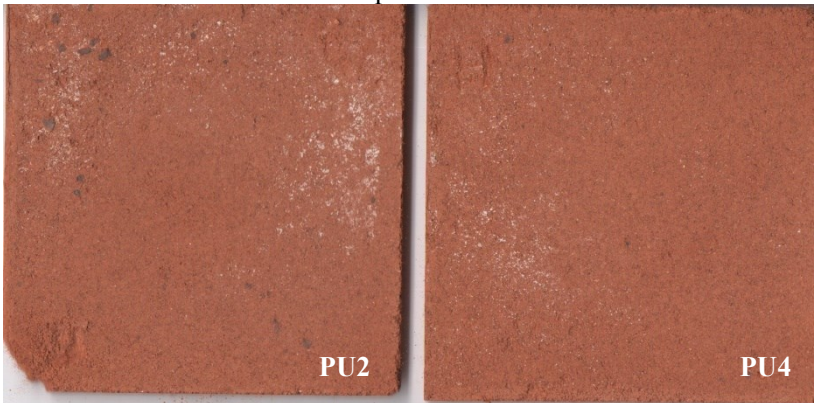
Fonte: Autora (2025).

Um aspecto que merece destaque na análise visual das amostras foi o surgimento de manchas esbranquiçadas na superfície cerâmica, fenômeno caracterizado como eflorescência (Figura 17). Esse efeito está relacionado à presença de sais solúveis na matéria-prima, os quais, mesmo após a etapa de queima, permanecem ativos e migram do interior da peça para a superfície por ação da umidade e posterior evaporação. Os principais sais envolvidos nesse processo incluem compostos de potássio, sódio e magnésio, frequentemente presentes em minerais das argilas ou

introduzidos por contaminações durante o processamento (Nhabih; Arat; Haidi, 2020).

Embora muitas vezes seja tratado como um defeito apenas visual, a eflorescência representa uma patologia cerâmica significativa, capaz de comprometer a durabilidade e a integridade microestrutural do produto ao longo do tempo. A cristalização desses sais na superfície ou internamente (subeflorescência) pode provocar tensões locais, microfissuras e degradação gradual do material, afetando diretamente a qualidade final do produto (Andrés *et al.*, 2009; Ribeiro *et al.*, 2020).

Figura 17 - Imagem da eflorescência nas amostras do PU2 e PU4, onde ocorreram este fenômeno físico-químico naturalmente.



Fonte: Autora (2025).

É imprescindível destacar, que a eflorescência apareceu naturalmente nas amostras PU2 e PU4, sem qualquer tipo de estímulo ou teste adicional, apenas com a umidade natural do ar absorvida pela peça que ocasionou tal fenômeno. Acredita-se que há a possibilidade de a eflorescência aparecer em todas as amostras caso haja um procedimento experimental. Entretanto, é importante ampliar o estudo de sais solúveis nas amostras e ensaios de eflorescência. É sabido que processos de sazonalidade da matéria-prima e controle na temperatura de queima, pode-se minimizar os problemas de eflorescência (Menezes *et al.*, 2006).

4.4.1 Possibilidades de aplicações dos sedimentos na construção civil

A utilização dos sedimentos do Rio Urussanga como insumo na construção civil representa uma oportunidade estratégica para empresas localizadas próximas ao rio, especialmente aquelas inseridas no Arranjo Produtivo Local (APL) da cerâmica vermelha do sul catarinense.

Além da aplicação na cerâmica vermelha, os sedimentos do Rio Urussanga apresentam potencial para serem utilizados em outras indústrias da construção civil. Dentre elas, destacam-se a produção de artefatos de concreto (como blocos, tubos e pavers), em que os sedimentos podem atuar como substitutos parciais da areia. Também se observa a possibilidade de aplicação na pavimentação de vias, como material para base ou sub-base estabilizada. Outras possibilidades mais tecnológicas incluem o uso na formulação de geopolímeros e na fabricação de blocos ecológicos prensados com solo-cimento. Tais alternativas ampliam o leque de reaproveitamento do material dragado, promovendo soluções regionais de baixo impacto ambiental e alta viabilidade técnica.

Considerando a quantidade de material disponível e sua granulometria apresentada, as possibilidades de usos podem ser os apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Principais usos do sedimento, com base em sua tipologia granulométrica.

Tipo	Usos Principais
Cascalho	Bases, drenagem, concreto estrutural
Areia grossa	Drenagem, base de pisos
Areia média	Argamassas, concreto leve
Areia fina	Acabamentos, reboco fino
Areia muito fina	Pavers, filtros finos
Silte	Evitar em estruturas – uso limitado
Argila	Impermeabilização, cerâmica

Fonte: Autora (2025).

A areia grossa e cascalho, podem ser utilizadas como base e sub-base de pavimentos, bem como fundações rasas, drenagem e concreto,

devido sua alta permeabilidade e resistência mecânica, sendo adequada para cargas e drenagem.

Já a área média pode ser utilizada para argamassas de assentamento e reboco, bem como pisos e contrapisos visto sua boa trabalhabilidade, que ainda permite certa permeabilidade, e tem resistência razoável.

A areia fina tem uso no acabamento fino de reboco, argamassas de revestimento e fabricação de blocos de concreto, com características de ser mais coesiva, facilita acabamentos mais suaves e aderência. A areia muito fina pode ser utilizada para enchimento de juntas (pavers e pisos intertravados), filtros e às vezes usada de forma misturada com outras granulometrias para ajustes de textura, porém há pouca permeabilidade, pode reter água demais e comprometer drenagem se usada sozinha.

O silte é pouco utilizado diretamente em obras devido à baixa resistência e alta plasticidade. Já a argila pode ser usada como impermeabilização natural, produção de tijolos cerâmicos, selagem de solos contaminados. Como possui alta plasticidade, expande e retrai com variação de umidade, o que pode causar trincas e instabilidade.

A separação dessas granulometrias para seu uso respectivo, deve ser feito através de peneiramento, onde as frações podem ser separadas para seu uso adequado. Considerando o alto índice de ferro, manganês e alumínio nas amostras, e a maior quantidade estimada de areia média e fina, pesquisou-se seu uso ideal para drenagens de águas subterrâneas. O sedimento com alto teor em ferro tende a conferir uma coloração avermelhada ou amarelada ao cimento, o que pode ser interessante para fins estéticos (como em blocos aparentes, pisos ou telhas cerâmicas) ou considerados críticos para a venda com padrão pouco estabelecido. Também deve ser verificado a reatividade do ferro, visto que se o ferro estiver na forma de óxidos estáveis, como hematita e magnetita, não há problema. Porém, se houver ferro solúvel (ferro ferroso), pode causar eflorescências (manchas), promover reações expansivas e comprometer a durabilidade.

A aplicação dos sedimentos fluviais do Rio Urussanga como insumo mineral na indústria da construção civil se mostra particularmente promissora quando considerada a realidade regional. A presença de empresas do Arranjo Produtivo Local (APL) da cerâmica vermelha no sul catarinense, muitas delas situadas próximas ao leito do rio ou em municípios inseridos na bacia hidrográfica, representa uma oportunidade concreta de valorização de um material que, até então, era tratado como resíduo.

A logística favorecida pela proximidade entre os pontos de desassoreamento e as unidades produtivas permite a redução de custos de

transporte, facilita o acesso ao material e promove uma cadeia de reaproveitamento regionalizada, de menor impacto ambiental. Além disso, o uso desses sedimentos contribui para a conservação de jazidas naturais de argila, estimula práticas industriais mais sustentáveis e amplia a responsabilidade socioambiental das empresas locais.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo caracterizar os sedimentos fluviais do Rio Urussanga, a fim de avaliar seu potencial como insumo mineral para a indústria da construção civil, considerando aspectos ambientais, legais, técnicos e de viabilidade. As análises realizadas permitiram classificar os sedimentos quanto à periculosidade, verificar a presença de contaminantes, investigar sua ecotoxicidade, bem como identificar sua composição física, química, térmica e mineralógica.

Os resultados obtidos demonstraram que, de acordo com os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10004/2004, os sedimentos analisados foram classificados como resíduos não perigosos, não tóxicos e não corrosivos. A análise ecotoxicológica indicou baixa toxicidade em grande parte das amostras, embora alguns parâmetros apresentem valores acima dos limites legais de qualidade, como ferro e manganês, o que reforça a importância de tratamentos prévios ou controle de aplicação conforme o destino pretendido.

A caracterização granulométrica apontou frações compatíveis com aplicações em cerâmica vermelha e em artefatos cimentícios. Ensaio de ceramização revelaram que o processo térmico contribui para a imobilização de metais, reduzindo sua solubilidade e potencial de contaminação, o que reforça a viabilidade ambiental da valorização dos sedimentos por meio do reaproveitamento em materiais de construção.

Além de representar uma alternativa técnica viável, a reutilização dos sedimentos contribui significativamente para a redução de impactos ambientais associados ao descarte em aterros e à extração de novas matérias-primas. Dessa forma, a proposta está alinhada com os princípios da economia circular e do desenvolvimento sustentável, especialmente em regiões como a Bacia do Rio Urussanga, onde os efeitos da mineração e do assoreamento ainda geram consequências socioambientais relevantes.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que os sedimentos avaliados apresentam potencial para aplicação na produção de cerâmica vermelha. Embora não tenham sido definidos, nesta etapa, os teores ideais de incorporação nas formulações cerâmicas, o processo de ceramização demonstrou-se uma alternativa ambientalmente viável para a imobilização de elementos potencialmente tóxicos. Nesse contexto, a inserção desses materiais na cadeia produtiva cerâmica pode contribuir simultaneamente para a mitigação de passivos ambientais e para o fortalecimento do desenvolvimento regional sustentável, alinhando-se aos princípios da economia circular e da valorização de resíduos.

SUGESTÕES DE TRABALHO FUTUROS

A presente pesquisa abre caminho para investigações complementares e aprofundamentos técnicos que podem ampliar o entendimento e a aplicabilidade dos sedimentos fluviais do Rio Urussanga. Entre os estudos futuros recomendados, destaca-se a necessidade de realizar testes de desempenho físico-mecânico dos corpos de prova cerâmicos elaborados com diferentes proporções de sedimento, a fim de avaliar sua resistência, durabilidade, absorção de água e demais propriedades relevantes para aplicações na construção civil.

Sugere-se, ainda, a condução de ensaios em escala piloto em unidades industriais, especialmente em empresas do APL de cerâmica vermelha da região, para verificar a viabilidade técnico-econômica da utilização do sedimento em condições reais de processo produtivo. Também seria pertinente ampliar o número de pontos de amostragem ao longo do rio, bem como realizar coletas em diferentes épocas do ano, possibilitando uma análise mais ampla da variabilidade espacial e sazonal das características dos sedimentos. Vale ressaltar a necessidade de verificar de forma mais precisa a quantidade a ser dragada por meio de ensaios complementares.

Outra possibilidade de aprofundamento consiste na comparação da ceramização com outras rotas tecnológicas de estabilização de contaminantes, como solidificação em matriz cimentícia, vitrificação ou utilização em materiais geopoliméricos. A realização de análise de ciclo de vida (ACV) também se mostra relevante, permitindo avaliar os impactos ambientais do uso do sedimento como insumo mineral, em comparação com matérias-primas tradicionais.

Complementarmente, a realização de estudos de monitoramento ambiental e ecotoxicológico em médio e longo prazo, especialmente nas áreas de aplicação do material, é fundamental para assegurar a segurança ambiental da proposta. Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de pesquisas voltadas à avaliação dos riscos ocupacionais e à saúde humana associados ao manuseio e uso dos sedimentos processados, bem como a análise da biomassa utilizada nos ensaios de ecotoxicidade, visando compreender a absorção e o acúmulo de metais pesados.

Por fim, o avanço nas discussões sobre políticas públicas e regulamentações que incentivem a valorização de sedimentos como recurso pode fortalecer o elo entre ciência, tecnologia e gestão ambiental, contribuindo para soluções sustentáveis e circulares em regiões impactadas por atividades minerárias e processos de assoreamento.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. **NBR 10005 - Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Cerâmica, 2004.

ABNT. **NBR 10006 - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. **NBR 10007 - Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. **NBR 12713 - Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com *Daphnia spp* (Crustacea, Cladocera)**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ABNT. **NBR 15115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ABNT. **NBR 15116 - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021.

ACCHAR, W.; DULTRA, E.J.V.; SEGADÃES, A.M. Untreated coffee husk ashes used as flux in ceramic tiles. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 75–76, p. 141–147, 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131713000719>.

ACCORSI, Osmar José *et al.* Estudo do comportamento da cota mínima do rio Acre nos últimos 43 anos e as consequências para o assoreamento futuro do rio. **Geociências**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 315–324, 2017.

ACORDI, J. *et al.* Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. **Resources Policy**, [s. l.], v. 80, p. 103243, 2023.

ALESC. Documentário Contará a História da Cerâmica Vermelha. **Assembléia Legislativa do Estado de Santa Catarina**, Florianópolis, SC, 18 dez. 2012. p. 42–43.

ANDRÉS, Ana *et al.* Physico-chemical characterisation of bricks all

through the manufacture process in relation to efflorescence salts. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 29, n. 10, p. 1869–1877, 2009. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221908006043>.

BALTZER, Frédéric. La sédimentation et la diagenèse précoce sur les côtes à mangroves. **Cah. ORSTOM**, Paris, v. 12, p. 175–189, 1982.

BEDDAA, Hamza *et al.* Reuse of river sediments in pervious concrete: Towards an adaptation of concrete to the circular economy and climate change challenges. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 368, p. 130443, 2023. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006182300154X>.

BEDDAA, Hamza *et al.* Reuse potential of dredged river sediments in concrete: Effect of sediment variability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 265, p. 121665, 2020. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620317121>.

BEVILACQUA, Jose Eduardo. **Estudo sobre a caracterização e a estabilidade de amostras de sedimentos do Rio Tietê, SP**. 1996. 190 f. - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 1996.

BOSTELMANN, Eleine. **Avaliação da concentração de metais em amostras de sedimento do reservatório Billings, Braço Rio Grande, São Paulo, Brasil**. 2006. 116 f. - Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2006.

CALAES, Gilberto Dias. **A economia brasileira e mundial: O setor mineral brasileiro e mundial e suas perspectivas de evolução a longo prazo**. Brasília, DF: SGM, 2009.

CAMPAGNA, Aline Fernanda. **Toxicidade dos sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho (São Carlos – SP): ênfase nas substâncias cobre, aldrin e heptacloro**. 2005. 268 f. - Universidade de São Paulo - USP, Pirassununga, SP, 2005.

CAMPAGNOLI, Fernando; MAZZILLI, Barbara Paci; MOREIRA, Sandra Regina Damatto. Datação de sedimentos aplicada ao monitoramento ambiental de Bacias Hidrográficas: Exemplo da Bacia do Rio Grande – Billings, SP. *In*: , 1999, Belo Horizonte, MG. **XIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, MG: ABRHidro, 1999. p. 22.

CARDOSO, Univaldo Coelho; CARNEIRO, Vânia Lúcia Nogueira; RODRIGUES, Édna Rabêlo Quirino. **APL Arranjo Produtivo Local: Série Empreendimentos Coletivos**. Brasília, DF: SEBRAE, 2014.

CARDOZO, Eduardo de Lara. **Geologia ambiental: Tecnologias para o desenvolvimento sustentável**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2017.

CASTILHOS, Zuleica Carmen *et al.* **Metodologia para o monitoramento da qualidade das águas da Bacia Carbonífera Sul Catarinense: ferramenta para gestão em poluição ambiental**. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010.

CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do estado de São Paulo 2003**. São Paulo, SP: [s. n.], 2004.

CHAPMAN, Peter M *et al.* Pore water testing and analysis: the good, the bad, and the ugly. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 359–366, 2002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X01002430>.

CHEN, Hongcai *et al.* Immobilisation of heavy metals in hazardous waste incineration residue using SiO₂–Al₂O₃–Fe₂O₃–CaO glass-ceramic. **Ceramics International**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 8468–8477, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884220335483>.

CIWEM. **Floods and Dredging: a reality check**. London, UK: [s. n.], 2014.

COMIN, André Biava *et al.* Characterization and processing of kaolin from southern Brazil for potential strategic application in the porcelain stoneware tiles manufacturing. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 148, p. 105157, 2024. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895981124003791>.

COMIN, André Biava *et al.* Measurement of apparent sintering activation energy for densification of clays. **Clay Minerals**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 299–305, 2021.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 344**. [S. l.], 2004. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=19496. Acesso em: 9 jun. 2025.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357**. [S. l.], 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 9 jun. 2025.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 420**. [S. l.], 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-acs.pdf>. Acesso em: 29 out. 2023.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 454**. [S. l.], 2012. Disponível em:

https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res_conama_454_2012_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

CROKE, Jacky; THOMPSON, Chris; FRYIRS, Kirstie. Prioritising the placement of riparian vegetation to reduce flood risk and end-of-catchment sediment yields: Important considerations in hydrologically-variable regions. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 190, p. 9–19, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479716310313>.

CRUZ, Carlos. **Otimização de processos e custo: APL de cerâmica vermelha de Morro da Fumaça se destaca por suas conquistas**. Rio de Janeiro, RJ, 2023. Disponível em: <https://revista.anicer.com.br/otimizacao-de-processos-e-custo/>. Acesso em: 3 dez. 2023.

CURY, Marlon Domingos. **Análise do risco e vulnerabilidade à inundação na bacia hidrográfica do rio Urussanga**. 2018. 126 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, 2018.

DA CUNHA, Edilson Leal. **Avaliação da contaminação bacteriana e por metais pesados na orla fluvial do município de Macapá, Amapá**. 2012. 154 f. - Universidade Federal do Amapá – UNIFAP, Macapá, AP, 2012.

DE ALBUQUERQUE JUNIOR, Celso Lopes *et al.* **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga: relatório síntese**. Palhoça, SC: Editora Unisul, 2020.

DE ALMEIDA, Rosana N. H. Martins *et al.* Extração de matéria orgânica aquática por abaixamento de temperatura: Uma metodologia alternativa para manter a identidade da amostra. **Quim. Nova**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 208–212, 2003.

DE LOS SANTOS VALLADARES, Luis *et al.* Physical and chemical characterization of sediments from an Andean river exposed to mining and agricultural activities: The Moquegua River, Peru. **International Journal of Sediment Research**, [s. l.], v. 37, n. 6, p. 780–793, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001627922000415>.

DE MENEZES, Carlyle Torres Bezerra; WATERKEMPER, Kátia. Evolução dos processos de degradação ambiental resultante da mineração de carvão em Santa Catarina de 1930-1973. In: MILIOLI, Geraldo; DOS SANTOS, Robson; CITADINI-ZANETTE, Vanilde (org.). **Mineração de carvão, meio ambiente e desenvolvimento sustentável no sul de Santa Catarina: uma abordagem interdisciplinar**. Curitiba, PR: Juruá, 2009. p. 205–2013.

DE OLIVEIRA, E. M. **Impacto Ambiental na exploração mineral: contribuição para uma prática sustentável**. Porto Alegre, RS: CPRM, 2006.

DEL GRANDE, Marcelo; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira; ROCHA, Odete. Distribuição de compostos organoclorados nas águas e sedimentos da bacia do rio Piracicaba/SP - Brasil. **Química Nova**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 678–686, 2003. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422003000500011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

DINH, H.L. *et al.* A sustainable solution to excessive river sand mining by utilizing by-products in concrete manufacturing: A state-of-the-art review. **Cleaner Materials**, [s. l.], v. 6, p. 100140, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2772397622001009>.

DOMINGOS CURY, Marlon *et al.* Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação como informação para o planejamento e a gestão territorial em bacia hidrográfica. **Caminhos de Geografia**, [s. l.], v. 22, n. 83, p. 160–175, 2021. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/56231>.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia**. 2ªed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 1998.

FINDORÁKOVÁ, Lenka *et al.* Thermal and Spectral Characterization of Bottom Sediment from the Water Reservoir Ružín No.1 in Eastern Slovakia. **Procedia Earth and Planetary Science**, [s. l.], v. 15, p. 839–843, 2015. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878522015003975>.

FISKESJÖ, Geirid. The Allium test — an alternative in environmental studies: the relative toxicity of metal ions. **Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, [s. l.], v. 197, n. 2, p. 243–260, 1988. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0027510788900966>.

FÖRSTNER, Ulrich; WITTMANN, Gottfried T. W. **Metal Pollution in the Aquatic Environment**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1981. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-69385-4>.

FREITAS, Rafael Andrade. **Análise de misturas e caracterização de matéria prima para a indústria da cerâmica vermelha**. 2013. 89 f. - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacases - RJ, 2013.

FROHLICH, Miguel Franco; NASPOLINI, Bianca Ferrazzo; JR., Isaac

Volschan. A evolução do processo de avaliação e gerenciamento de material relacionado às atividades de dragagem no Brasil: Uma análise comparativa entre as Resoluções CONAMA n° 344/04 e n° 454/12. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 131–140, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000100131&lng=pt&tlng=pt.

GARRELS, Robert M.; CHRIST, Charles Louis. **Solutions, Minerals and Equilibria**. San Francisco: Freeman, Cooper & Company, 1965.

GOES FILHO, Hildebrando de Araujo. **Dragagem e Gestão dos Sedimentos**. 2004. 162 f. - Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

HEINRICH, Alessandra Belotserkovets *et al.* Gerenciamento de sedimentos do desassoreamento do rio Belém na área urbana de Curitiba: Um estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 626–636, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000200626&lng=pt&tlng=pt.

HOUSE, William A.; DENISON, Frank H. Exchange of Inorganic Phosphate between River Waters and Bed-Sediments. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 36, n. 20, p. 4295–4301, 2002. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es020039z>.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira** Manuais Técnicos em Geociências, 1. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 1992.

IPAT/UNESC. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para o Projeto de Desassoreamento do Rio Urussanga**. 2014. 526 f. - Universidade do Extremo Sul Catarinense., Criciúma, SC, 2014.

JEE, Hyo Kyung; KIM, Han Na; PARK, Jin Hee. Immobilization of manganese in solution and soil contaminated with trivalent chromium using biochars. **Applied Biological Chemistry**, [s. l.], v. 67, n. 1, p. 118, 2024. Disponível em: <https://appliedbiolchem.springeropen.com/articles/10.1186/s13765-024-00969-5>.

KREBS, Antonio Silvio Jornada. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da bacia hidrográfica do rio Araranguá, SC**. 2004. 375 f. - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2004.

LASTRES, Helena Maria Martins *et al.* **Políticas para APLs: A**

experiência do BNDES. *In:* BOLETIM REGIONAL, URBANO E AMBIENTAL. [s. l.]: IPEA, 2014. p. 19–33.

LEGLER, Hélio Costet de Mascheville; VICENZI, Juliane; BERGMANN, Carlos Pérez. Caracterização Comparativa de Fundentes para Emprego na Indústria Cerâmica. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 14, n. 4, 2009.

LI, Chengming *et al.* Immobilization of heavy metals in ceramsite prepared using contaminated soils: Effectiveness and potential mechanisms.

Chemosphere, [s. l.], v. 310, p. 136846, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653522033392>.

LIN, Huirong *et al.* Preparation of Glass-Ceramics via Cosintering and Solidification of Hazardous Waste Incineration Residue and Chromium-Containing Sludge. **ACS Omega**, [s. l.], v. 6, n. 37, p. 23723–23730, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c01659>.

LIPPS, William C.; BRAUN-HOWLAND, Ellen B.; BAXTER, Terry E. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24th. ed. Washington, D.C.: APHA American Public Health Association, 2023.

LIRA, H L; NEVES, G A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 110–117, 2013.

LIU, Mingwei; XU, Guoren; LI, Guibai. Effect of the ratio of components on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 105, p. 109–116, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582016302658>.

MACHADO, Diorgines Mattos *et al.* Valorization of Brazilian waste foundry sand from circular economy perspective. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 407, p. 137046, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652623012040>.

MANOHARAN, C. *et al.* Analysis of temperature effect on ceramic brick production from alluvial deposits, Tamilnadu, India. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 20–25, 2011.

MAPUNA, Elise Colette Ngo *et al.* Mineralogical, geochemical, and physicommechanical features of the Mbalmayo lateritic clays (Southern Cameroon) for potential use as raw materials in the making of fired bricks. **Arabian Journal of Geosciences**, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 671, 2023.

Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s12517-023-11791-6>.

MARIUS, Claude. **Mangroves du Sénégal et de la Gambie, écologie, pédologie, géochimie: mise en valeur et aménagement**. Paris: ORSTOM, 1985.

MARQUES, Andressa Oliveira *et al.* Os Arranjos Produtivos Locais como estratégia para o desenvolvimento econômico da Amazônia Ocidental. *In:* , 2010, São Carlos, SP. **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. São Carlos, SP: ABEPRO, 2010. p. 11.

MENEZES, R. R. *et al.* Sais solúveis e eflorescência em blocos cerâmicos e outros materiais de construção - revisão. **Cerâmica**, [s. l.], v. 52, n. 321, p. 37–49, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132006000100006&lng=pt&tlng=pt.

MEZENCEVOVA, Andrea *et al.* Utilization of Savannah Harbor river sediment as the primary raw material in production of fired brick. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 113, p. 128–136, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479712004380>.

MORALES, Gabriela Castillo. **Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de agua: estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones**. Cidade do México: IMTA, 2004.

MORENO-MAROTO, José Manuel; ALONSO-AZCÁRATE, Jacinto. What is clay? A new definition of “clay” based on plasticity and its impact on the most widespread soil classification systems. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 161, n. April, p. 57–63, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.011>.

MÜLLER, Germa. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Veränderungen seit. **Umschau**, [s. l.], v. 79, p. 778–783, 1979.

NHABIH, Hussein Talab; ARAT, Kareem Khalaf; HAIDI, Ali Saleem. Methods of Processing Efflorescence of Clay Brick. **International Journal of Scientific Engineering and Science**, [s. l.], v. 3, n. 12, p. 48–56, 2020.

OLIVEIRA, K.A. *et al.* Ceramic shell waste valorization: A new approach to increase the sustainability of the precision casting industry from a circular economy perspective. **Waste Management**, [s. l.], v. 157, p. 269–278, 2023.

RAUPP-PEREIRA, Fabiano. **Valorization of industrial waste as an alternative mineral source: ceramic and cementitious compositions**.

2006. 256 f. - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2006.

REBELO, Wagner Benedet *et al.* Valorization of the Residual Fraction of Coal Tailings: A Mineral Circularity Strategy for the Clay Ceramic Industry in the Carboniferous Region of Santa Catarina, Southern Brazil. **Materials**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 2131, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/9/2131>.

RESTREPO, José Julio Barrios. **Avaliação de elementos-traço em amostras de sedimento marinho ao longo do litoral catarinense**. 2007. 96 f. - Univeridade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2007.

RIBEIRO, T. S. *et al.* Metais pesados em sedimentos dos rios Imbé (MG) e alto, médio e baixo Paraíba do Sul (RJ/SP). *In:* , 2007, Atibaia, SP. **XI Congresso Brasileiro de Geoquímica**. Atibaia, SP: Sociedade Brasileira de Geoquímica - SBGq, 2007. p. 4.

RIBEIRO, A. G. *et al.* The Effect of Soluble Mineral Salts in Ceramic Brick Masonry. **International Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 685–699, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40999-020-00502-x>.

RIELLA, H.G.; FRANJNDLICH, E.U. de C.; DURAZZO, M. Caracterização e Utilização de Fundentes em Massas Cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 33–36, 2002.

RIETVELD, Hugo M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. **J. Appl. Crystallogr.**, [s. l.], v. 2, n. 65, p. 65–71, 1969.

RIFA, Asim *et al.* A systematic comparison of performance of recycled concrete fine aggregates with other alternative fine aggregates: An approach to find a sustainable alternative to river sand. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 78, p. 107695, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710223018752>.

ROCHA, F. V. **Impactos causados pelas mineradoras: uma questão de gestão ambiental**. Palmas, TO: CEULP/ULBRA, 2011.

SAMARA, Mazen; LAFHAJ, Zoubeir; CHAPISEAU, Christophe. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 163, n. 2–3, p. 701–710, 2009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389408010431>.

SC. **Lei nº 10.949: Legislação Estadual - Recursos Hídricos**. [S. l.], 1998.

Disponível em:

https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Legislacao/Lei-Estadual-10949-1998.pdf. Acesso em: 20 nov. 2023.

SILVESTRINI, Tiago A. M.; D' AQUINO, Carla De Abreu. Dinâmica dos parâmetros oceanográficos em um estuário impactado por atividades de mineração de carvão. **Pesquisas em Geociências**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. e103404, 2020. Disponível em:

<https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/109992>.

SIMÃO, Lisandro *et al.* Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 319, p. 128678, 2021.

SØNDERGAARD, Martin; JENSEN, Jens Peder; JEPPESEN, Erik. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes.

Hydrobiologia, [s. l.], v. 506–509, n. 1–3, p. 135–145, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1023/B:HYDR.0000008611.12704.dd>.

THOMAS, R. L. A protocol for the selection of process-oriented remedial options to control in situ sediment contaminants. **Hydrobiologia**, [s. l.], v. 149, n. 1, p. 247–258, 1987. Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1007/BF00048664>.

USEPA. **Method 3050B (SW-846): Acid Digestion of Sediments, sludges, and soils**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 1996.

USEPA. **Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Seiments, sludges, and soils**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2007.

VESTENA, Leandro Redin. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. 2008. 268 f. - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2008.

VILAÇA, A.S.I. *et al.* Waste valorization of iron ore tailings in Brazil: Assessment metrics from a circular economy perspective. **Resources Policy**, [s. l.], v. 75, p. 102477, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420721004852>.

WANG, Jiaqi *et al.* A study of the solidification and stability mechanisms of heavy metals in electrolytic manganese slag-based glass-ceramics.

Frontiers in Chemistry, [s. l.], v. 10, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2022.989087/full>.

WENTWORTH, Chester K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, [s. l.], v. 30, n. 5, p. 377–392, 1922. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/622910>.

XU, Guoren; ZOU, Jinlong; LI, Guibai. Stabilization/Solidification of Heavy Metals in Sludge Ceramsite and Leachability Affected by Oxide Substances. **Environmental Science & Technology**, [s. l.], v. 43, n. 15, p. 5902–5907, 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es900139k>.

ZOCHE, Jairo José *et al.* Technosols in coal mining areas: Viability of combined use of agro-industry waste and synthetic gypsum in the restoration of areas degraded. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 13, p. 100618, 2023.