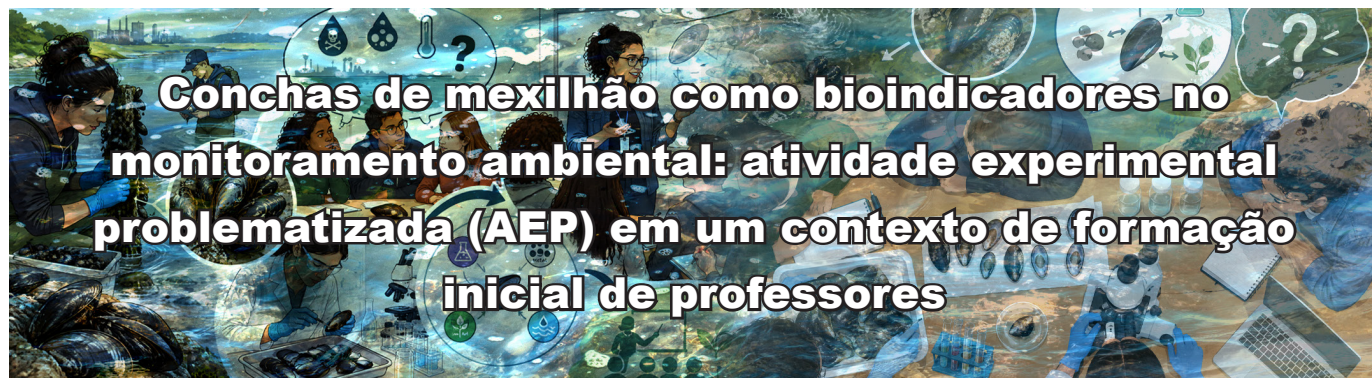




Conchas de mexilhão como bioindicadores no monitoramento ambiental: atividade experimental problematizada (AEP) em um contexto de formação inicial de professores

Nathalia Luiza Passamani Wyatt, Bruna Marine Damm, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima e Paulo Rogerio Garcez de Moura

Abordagens de ensino contextualizadas têm sido cada vez mais utilizadas para favorecer a aprendizagem, frequentemente envolvendo ações relacionadas à experimentação e à resolução de problemas. Este artigo investiga as contribuições da Atividade Experimental Problematizada (AEP) no ensino de Química Analítica para estudantes de licenciatura em Química. Para isso, a determinação de elementos traço em conchas de mexilhão para fins de monitoramento ambiental foi utilizada como contexto em uma intervenção didática. Nos moldes da Teoria Fundamentada, foi construída uma teoria substantiva baseada em um modelo paradigmático. Esse modelo apresenta como categoria central o “Ensino de Química contextualizado pela problematização do monitoramento ambiental com conchas de mexilhão”. As consequências do estudo são contribuições para a formação inicial dos professores de forma crítica e reflexiva, através do desenvolvimento de habilidades cognitivas e aprendizagem colaborativa.

► formação de professores, teoria fundamentada, monitoramento ambiental ◀

Recebido em 26/05/2026; aceito em 08/09/2026

Introdução

O desenvolvimento acelerado da tecnologia e da industrialização nas últimas décadas resultou em um aumento no consumo de muitos elementos potencialmente tóxicos, principalmente metais. Em consequência, houve um aumento na contaminação ambiental devido ao descarte irregular de produtos contendo esses elementos, como chumbo, cádmio, mercúrio e níquel. Essa contaminação se deve ao fato de que, além de serem prejudiciais à saúde humana, não são biodegradáveis, o que dificulta a sua decomposição na natureza e favorece a absorção por organismos (Coleman *et al.*, 2017).

Alguns elementos se acumulam em ecossistemas aquáticos, seja por exposição direta ao ambiente ou indireta, pela ingestão de alimentos. Com frequência são descartados sem qualquer tratamento, sendo transferidos da água e dos sedimentos marinhos para plantas e animais, resultando em degradação em diferentes níveis tróficos. Os efeitos das ações desses elementos sobre diferentes organismos, como mexilhões e peixes, no curto ou longo prazo, podem incluir mudanças bioquímicas, impactando o ciclo reprodutivo e o crescimento do animal (Ebrahimi e Taherianfard, 2011; Romero-Freire *et al.*, 2024; Chouikh *et al.*, 2024).

Os mexilhões compõem a dieta humana em várias regiões do planeta, representando em muitos lugares a principal atividade econômica da comunidade. Várias espécies se comportam como bioindicadores de elementos tóxicos devido à sua capacidade de filtragem, ampla resistência a condições ambientais adversas e natureza sésil, não se movendo ao se fixar em determinado local (Marengoni *et al.*, 2013; Fattorini, 2025).

As conchas dos mexilhões são compostas principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3), sendo a calcita e a aragonita os principais minerais. A composição química e mineral da concha é afetada por parâmetros ambientais e fisiológicos do mexilhão (Forleo *et al.*, 2021). Por serem bioindicadores eficazes, os mexilhões são amplamente usados em pesquisas de monitoramento ambiental em ecossistemas marinhos, sendo importantes na avaliação do nível de poluição em zonas costeiras e em ambientes estuarinos onde estão presentes (Fattorini, 2025; Bennion *et al.*, 2019).

O contexto do monitoramento ambiental baseado no uso de conchas de mexilhão como indicadores naturais de poluição tem relevância em níveis nacional e global, envolvendo questões econômicas, sociais e, em grande medida, ambientais. No que diz respeito à área do ensino da Química, vários estudos introduziram abordagens socioambientais

para promover um aprendizado mais contextualizado e interdisciplinar alinhado a essas demandas (Oliveira *et al.*, 2024; Domingues *et al.*, 2022; Adams e Nunes, 2022).

O uso de amostras ambientais tem se mostrado uma estratégia eficaz para contextualizar conceitos de química analítica e promover o engajamento dos alunos. Alguns estudos publicados exploram a aplicação de técnicas de plasma indutivamente acoplado em contextos ambientais, como a determinação de arsênio em amostras de água e análise de solo usando Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (em inglês, ICP-OES) e investigação de interferências espectrais em Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (em inglês, ICP-MS) (Donnell *et al.*, 2016; Pillay, 2020; Newman, 2018). Essas abordagens destacam o potencial das técnicas espectrométricas para apoiar o ensino de química analítica por meio de aplicações no mundo real, promovendo a compreensão sobre determinação de elementos traço, parâmetros instrumentais e interpretação de dados.

Nesse sentido, propõe-se uma intervenção educacional adotando a Atividade Experimental Problematicada (AEP) como base metodológica. A AEP é uma estratégia teórico-experimental que estimula a curiosidade, o pensamento científico e as habilidades de resolução de problemas por meio de aprendizado investigativo e significativo (Silva e Moura, 2018; Silva *et al.*, 2024).

A AEP parte da proposição de um problema que guiará todo o caminho didático, integrando o conhecimento científico com temas transversais ligados à realidade do aluno ou de sua comunidade. O planejamento de uma AEP é realizado a partir de seu eixo teórico, no qual são definidos o problema proposto, o objetivo experimental e as diretrizes metodológicas (Silva *et al.*, 2022). O eixo metodológico compreende a execução da intervenção didática, sendo dividido em cinco momentos (Silva e Moura, 2018): discussão prévia, organização e desenvolvimento, retorno ao grupo de trabalho, socialização e sistematização.

Estudos recentes identificaram as contribuições da AEP na formação inicial de professores, a fim de verificar indícios de aprendizagem significativa e desenvolvimento cognitivo e metacognitivo dos participantes da pesquisa. Os temas geradores usados para a problematização são diversos, e a maioria deles explora o aspecto ambiental, como a produção de biocombustíveis a partir de resíduos de pimenta-do-reino, o reaproveitamento de sementes de mamão e o uso de mel de abelhas sem ferrão (Welsing *et al.*, 2024; Siqueira *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2025; Damm *et al.*, 2025).

A formação de profissionais de química no Brasil é permeada por desafios, especialmente em relação às limitações curriculares que dificultam a integração entre o conhecimento teórico adquirido durante a graduação e sua aplicação em

contextos profissionais. Essa lacuna afeta não apenas futuros docentes, mas também bacharéis, aqui entendidos como futuros instrutores de química em contextos mais amplos. Tais dificuldades se refletem nos desafios enfrentados por esses profissionais ao contextualizar o conhecimento químico com temas transversais, como questões socioambientais (Pinheiro *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2017).

Diante do exposto, este estudo objetiva investigar as contribuições de uma intervenção didática baseada na AEP em um contexto de formação inicial em Química. A intervenção é estruturada em torno da temática do monitoramento ambiental de elementos tóxicos, utilizando conchas de mexilhão como bioindicadores de contaminação. Esse tema foi escolhido devido à relevância científica e ao potencial de promover a contextualização do conhecimento químico por meio de questões ambientais do mundo real que integram dimensões ecológicas, sociais e econômicas.

Ao envolver professores em formação em atividades investigativas e experimentais orientadas a problemas, o estudo busca examinar como essa abordagem pode fomentar o desenvolvimento do aprendizado de conceitos científicos relacionados à química ambiental e técnicas analíticas,

reduzindo a lacuna entre o conhecimento teórico adquirido e as demandas práticas do ensino em sala de aula. Para alcançar esses objetivos, a metodologia da Teoria Fundamentada é adotada, de modo a construir uma teoria substantiva baseada em dados empíricos coletados durante a implementação da intervenção (Charmaz, 2009). Por meio da análise sistemática de dados, a

pesquisa propõe a identificação de padrões e significados que emergem das experiências dos participantes, contribuindo para a discussão sobre estratégias inovadoras na formação de professores em Química.

Metodologia

Um total de sete estudantes do 5º período de licenciatura em Química participaram do conjunto de atividades realizadas como parte do AEP na Universidade Federal do Espírito Santo. A intervenção educacional foi desenvolvida ao longo de oito encontros presenciais, com uma carga horária de 28 horas, na disciplina Pesquisa e Prática Pedagógica no Ensino de Química I (Analítica), durante o semestre acadêmico de 2025/1. O projeto de pesquisa foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal do Espírito Santo.

A AEP permitiu a abordagem de domínios do conhecimento relevantes para a formação inicial em Química, integrando conteúdo conceitual e aplicado. Entre eles, destacam-se as bases teóricas da ICP-OES e da ICP-MS, incluindo princípios de operação, geração de sinais e análise quantitativa. A atividade também abordou conceitos

Estudos recentes identificaram as contribuições da AEP na formação inicial de professores, a fim de verificar indícios de aprendizagem significativa e desenvolvimento cognitivo e metacognitivo dos participantes da pesquisa. Os temas geradores usados para a problematização são diversos, e a maioria deles explora o aspecto ambiental

relacionados ao monitoramento ambiental, como o uso de bioindicadores, processos de biomagnificação em cadeias tróficas, legislações ambientais e especiação química.

Descrição da AEP

A AEP, intitulada “Bioindicadores em ação: explorando o monitoramento ambiental através de conchas de mexilhão”, foi planejado a partir de seu eixo teórico (Quadro 1).

Quadro 1. Eixo teórico da AEP

Problema Proposto: Como as conchas de mexilhão podem ser usadas para detectar a presença de elementos potencialmente tóxicos no ambiente?
Objetivo Experimental: Desenvolver habilidades de preparação de amostras e análise quantitativa de elementos traço em Química Analítica. Além de identificar e interpretar os resultados no contexto do monitoramento ambiental, é preciso refletir sobre as implicações sociais e ecológicas da presença de substâncias tóxicas no meio ambiente.
Diretrizes Metodológicas: Roteiro de preparação da amostra e análise quantitativa a serem realizados sem um procedimento experimental definido. Literatura recomendada e legislação sobre o assunto (Baccan et al., 2000; Skoog et al., 2007; Krug e Rocha, 2016; Brasil, 2005; Brasil, 2022).

O eixo metodológico deve estar alinhado com o eixo teórico, especialmente em relação à proposição do problema e ao objetivo experimental. O Quadro 2 resume o eixo metodológico nos cinco momentos, com suas respectivas ações. No Material Suplementar (1S, 2S e 3S), são apresentados detalhes acerca do roteiro experimental utilizado na etapa de organização e desenvolvimento. Todas as atividades foram desenvolvidas em grupos.

Instrumentos de coleta e processamento de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de instrumentos escritos e digitais, além de gravações sonoras. Dentre os materiais escritos, foram aplicadas fichas experimentais com questões norteadoras para o entendimento do experimento durante a fase de organização e desenvolvimento. Os materiais digitais consistiram na elaboração conjunta de uma nuvem de palavras através da plataforma *Mentimeter*®, no preenchimento de planilhas de tratamento de dados fornecidos pelos espectrômetros, e nos mapas mentais estruturados a partir do plano de ação proposto na etapa de sistematização. Gravações de áudio foram feitas em todos os encontros e atuaram como instrumento auxiliar no tratamento dos dados.

A análise das fichas experimentais, planilhas de tratamento de dados e mapas mentais foi realizada a partir da Teoria Fundamentada em Dados (TFD) (Charmaz, 2009), com auxílio do software MAXQDA® *Analytics Pro*, versão 24.2.033. O processo analítico começa com a codificação aberta (identificando incidentes em estágio inicial), seguida pela codificação axial (estabelecimento de relações entre categorias analíticas) e codificação seletiva (agrupamento

Quadro 2: Eixo metodológico da AEP

Discussão Prévia: • Apresentação teórica: poluição da água, do ar e do solo; toxicidade de metais; biomonitoramento e contaminação ambiental; legislação ambiental • Roda de conversa • Construção de nuvem de palavras: <i>Mentimeter</i>®
Organização e Desenvolvimento: • Preparação da amostra (liofilização, quarteamento, moagem, decomposição ácida em forno de radiação micro-ondas) • Determinação da concentração de Cd, Pb, Ni, Hg, As, Cr, Zn e Fe por espectrometria atômica (ICP-MS e ICP-OES) em amostras de conchas de mexilhão
Retorno ao Grupo de Trabalho: • Preenchimento dos formulários experimentais e discussões intragrupos sobre as observações e dados coletados durante a atividade experimental
Socialização: • Tratamento dos dados obtidos em ICP-MS e ICP-OES em planilha Excel® • Comparação dos resultados experimentais, discussões e retomada do problema
Sistematização: • Inferências: elaboração de produtos compilatórios (mapa mental descrevendo o plano de ação)

de categorias em torno de uma categoria central). Esse processo apoia a integração de categorias em um modelo paradigmático – contexto, estratégias, condições causais, condições intermediárias e consequências –, culminando no desenvolvimento de uma teoria substantiva.

Resultados e discussão

Construção da Teoria Substantiva

Uma teoria substantiva foi desenvolvida para investigar como a integração de um contexto de monitoramento ambiental baseado em conchas de mexilhão, por meio da determinação de elementos traço, contribui para a formação de profissionais de Química. Para isso, os instrumentos de coleta de dados elaborados durante a AEP foram codificados. A codificação aberta desses instrumentos resultou em 148 códigos, refinados para 21 códigos axiais. Dessa classificação, surgiram seis categorias analíticas (Quadro 3).

As duas primeiras categorias analíticas estão relacionadas ao tema usado para problematizar a aplicação didática. As categorias 3, 4 e 5 estão associadas a experimentos em laboratório desenvolvidos na AEP. Por fim, a categoria 6 abrange códigos alinhados ao contexto educacional. Cada uma dessas categorias é descrita abaixo.

Categoria 1: Mexilhões

A categoria “Mexilhões” trata do tema central da AEP, e a partir dela foi possível relacionar aspectos científicos com o contexto regional, social, cultural e econômico. Nesse sentido, os estudantes refletem sobre a realidade em que são

Quadro 3: Categorias analíticas mais representativas e códigos axiais com os respectivos números de incidentes (*n*)

Categorias analíticas	Códigos axiais e número de incidentes (<i>n</i>)
1. Mexilhões	Espírito Santo (<i>n</i> =22) Amostras (<i>n</i> =60) Bivalves (<i>n</i> =21)
2. Monitoramento Ambiental	Ciência-sociedade (<i>n</i> =12) Bioindicadores (<i>n</i> =15) Contaminação ambiental (<i>n</i> =75) Legislação ambiental (<i>n</i> =23)
3. Preparo de Amostras	Representatividade amostral (<i>n</i> =13) Pré-tratamento de amostras (<i>n</i> =25) Decomposição de amostras (<i>n</i> =243)
4. Determinação de Elementos Traço	Elementos traço (<i>n</i> =143) Concentração (<i>n</i> =107) Técnicas instrumentais (<i>n</i> =192)
5. Rotinas de Laboratório	Materiais (<i>n</i> =19) Desafios (<i>n</i> =104) Eficiência (<i>n</i> =51)
6. Ensino de Química	Contextualização do tema (<i>n</i> =96) Experimentação (<i>n</i> =51) Aprendizagem (<i>n</i> =332) Divulgação científica (<i>n</i> =21) Resolução de problemas (<i>n</i> =69)

4

inseridos a partir de uma perspectiva mais geral e crítica, integrando ciência, sociedade e meio ambiente.

Categoria 2: Monitoramento ambiental

Esta categoria promove a integração ciência-sociedade, a fim de usar a produção científica como ferramenta de reflexão, monitoramento e proposta de soluções relacionadas a questões ambientais. São exploradas as possibilidades das conchas de mexilhão como bioindicadores de elementos potencialmente tóxicos, de modo a verificar indícios de contaminação ambiental em um ecossistema (Chahouri *et al.*, 2023). Nele, os estudantes avaliam possíveis riscos à saúde comparando os resultados obtidos em laboratório com a legislação ambiental sobre moluscos bivalves, já que não existe legislação disponível para os limites máximos tolerados de elementos traço nas conchas. A nuvem de palavras produzida na plataforma *Mentimeter*® ao final da discussão prévia reflete essa categoria analítica (Figura 1).

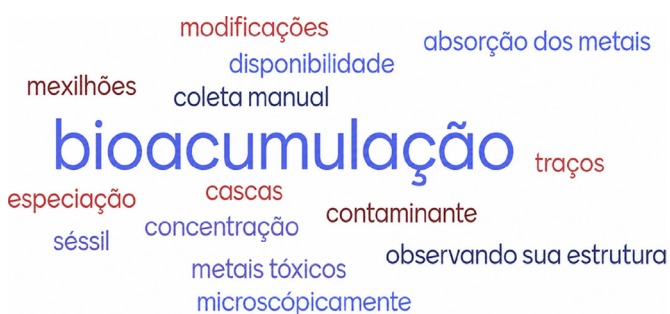


Figura 1: Nuvem de palavras.

Ao observar a Figura 1, percebe-se que o termo de maior destaque foi “bioacumulação”, indicando que os alunos conseguiram identificar a ideia central da discussão: a capacidade dos mexilhões de bioacumular, em suas cascas e tecidos, elementos “traços”, em particular “metais tóxicos”, de modo a contribuir em estudos de monitoramento ambiental. O termo “sésseis” demonstra que os estudantes reconhecem a importância dessa característica: por serem sedentários, fixos a um substrato, os mexilhões refletem as condições a longo prazo do ambiente onde vivem, sendo adequados como bioindicadores (Beyer *et al.*, 2017).

As palavras “especiação”, “modificações”, “disponibilidade” e “contaminante” sugerem que, além de entender a presença de elementos traço como possíveis contaminantes, os alunos também compreendem suas formas químicas e a existência de interações com o ambiente como fatores que afetam sua biodisponibilidade. Portanto, a deposição de metais na estrutura da concha pode ser influenciada por vários fatores, como temperatura da água, pH e salinidade (Forleo *et al.*, 2021; Peana *et al.*, 2021). Ampliando essa perspectiva, os termos “microscopicamente” e “observando sua estrutura” reforçam a reflexão sobre esses aspectos, que estão ligados à forma como os elementos interagem física e quimicamente no ambiente.

A expressão “coleta manual” tem pouca relação com outras expressões que compõem a nuvem de palavras, mas demonstra a importância da coleta artesanal de mexilhões no estado do Espírito Santo. Isso está relacionado a questões relevantes levantadas durante a aula, como a cultura da região e a vulnerabilidade socioeconômica dos marisqueiros. Nesse sentido, destaca-se a integração entre conceitos estruturantes do tema, apresentando uma relação próxima com o problema proposto ao final da aula: “Como as conchas de mexilhão podem ser usadas para detectar a presença de elementos potencialmente tóxicos no ambiente?”.

Categoria 3: Preparo de Amostras

A categoria 3 evidencia a importância do preparo de amostras para garantir a confiabilidade analítica, destacando a decomposição de amostras como principal etapa para disponibilização dos analitos em solução. As discussões abordaram métodos de pré-tratamento e decomposição ácida, além da comparação entre metodologias, favorecendo a tomada de decisões e reflexões no ensino de Química. Também foi ressaltado que essa é a etapa experimental mais suscetível a erros (Krug e Rocha, 2016).

Partindo das amostras já liofilizadas, os grupos de estudantes realizaram o quarteamento e a moagem. Depois, foram solicitados a realizar pesquisas na literatura para propor misturas ácidas eficazes para o processo de decomposição em forno de radiação micro-ondas. A escolha deveria se basear na matriz das cascas de mexilhão, composta principalmente por CaCO_3 (Kizilkaya *et al.*, 2024), e em aspectos relevantes da rotina laboratorial, como custo, disponibilidade de reagentes e eficiência do processo. Os grupos definiram as seguintes misturas de reagentes para o

procedimento: HNO_3 3:1 HCl + H_2O_2 (G1) e HNO_3 3:1 HCl (G2). O quadro 4 apresenta as justificativas fornecidas pelos alunos para suas escolhas.

Quadro 4: Trechos retirados das fichas experimentais justificando a escolha da mistura de reagentes para decomposição via micro-ondas

G1	"O HNO_3 é comum em digestões para análises químicas, atuando como agente oxidante da matéria orgânica e formando nitratos solúveis, favorecendo a recuperação dos metais. O H_2O_2 atua como um forte agente oxidante auxiliar, oxidando a matéria orgânica que o HNO_3 não conseguiu oxidar. E, por fim, a mistura dos ácidos ajuda para que o carbonato seja removido da matriz, na qual a reação do CaCO_3 com íons H^+ em solução formam CO_2 ."
G2	"O objetivo do experimento é a análise de metais tóxicos na casca de mexilhão, a água régia (como é conhecida) é uma mistura forte e altamente corrosiva sendo capaz de quebrar a matriz mineral da casca e liberar os metais tóxicos presentes."

Os registros indicam que os grupos demonstraram conhecimento sobre o processo de decomposição ácida, direcionando suas respostas para a interação entre os reagentes e a matriz amostral. No entanto, o grupo 1 descreveu o processo com mais detalhes, destacando as reações químicas envolvidas e o desempenho de H_2O_2 e HNO_3 como agentes oxidantes (Santos *et al.*, 2019). Assim, a resposta forneceu indícios de que os estudantes foram capazes de articular em seu raciocínio características da amostra (matriz carbonática) com a capacidade oxidante dos reagentes utilizados, a fim

de alcançar uma decomposição total da matriz e solubilizar os analitos de interesse.

Categoria 4: Determinação de Elementos Traço

Esta categoria oferece suporte para a categoria 2, com destaque para a compreensão de técnicas espectrométricas, abordando questões como custo, sensibilidade e princípio de operação. A categoria favorece o desenvolvimento de habilidades práticas e analíticas, pois os estudantes devem comparar as técnicas, relacionando-as com a matriz da amostra, os analitos de interesse e sua faixa de concentração, de modo a escolher a mais adequada.

Após a preparação das amostras, os estudantes realizaram cálculos para a construção das curvas de calibração em ICP-MS e em ICP-OES. Essas técnicas se baseiam na atomização ou ionização dos analitos presentes na amostra por meio de um plasma indutivamente acoplado (ICP). No ICP-MS, os íons formados são direcionados para um espectrômetro de massas, que seleciona e quantifica os íons com uma relação massa/carga de interesse. No ICP-OES, o espectro é gerado a partir da medição da radiação eletromagnética emitida pelos átomos ou íons excitados quando retornam ao estado fundamental (Dean, 2005).

Ao observar as discussões sobre a construção da curva, constatou-se que os alunos apresentavam dificuldades na execução dos cálculos, especialmente em relação às unidades de concentração e aos cálculos de diluição. A Tabela 1 mostra os resultados dos grupos em relação às concentrações de elementos traço encontrados. Os dados são reportados de acordo com a técnica espectrométrica e a metodologia de preparação de amostra utilizadas.

Ao comparar os resultados obtidos por ICP-MS, verifica-se que os procedimentos escolhidos pelos grupos

Tabela 1: Concentrações dos elementos obtidas pelos grupos G1 e G2 após diferentes procedimentos de preparo de amostras e determinações por ICP-MS (em $\mu\text{g/g}$) e por ICP-OES (em mg/g)

Elemento		Resultados Grupo 1		Resultados Grupo 2	
		Procedimento G1	Procedimento Pesquisador	Procedimento G2	Procedimento Pesquisador
Concentração ($\mu\text{g/g}$) $\pm$ Desvio Padrão					
ICPMS	As	4,5 $\pm$ 2,6	0,268 $\pm$ 0,028	7,90 $\pm$ 0,41	0,678 $\pm$ 0,048
	Cd	< 0,0010	0,0029 $\pm$ 0,0010	0,00290 $\pm$ 0,00020	0,0026 $\pm$ 0,0010
	Cr	0,172 $\pm$ 0,096	0,111 $\pm$ 0,039	0,301 $\pm$ 0,083	0,140 $\pm$ 0,014
	Hg	0,654 $\pm$ 0,014	1,29 $\pm$ 0,54	0,8278 $\pm$ 0,0046	0,8991 $\pm$ 0,0016
	Ni	2,02 $\pm$ 0,47	1,95 $\pm$ 0,46	2,45 $\pm$ 0,19	2,22 $\pm$ 0,26
	Pb	0,80 $\pm$ 0,19	0,436 $\pm$ 0,022	0,241 $\pm$ 0,027	0,155 $\pm$ 0,012
	Zn	-	-	< 0,031	4,3 $\pm$ 2,1
Concentração (mg/g) $\pm$ Desvio Padrão					
ICPOES	Cd	1,4*	0,47*	< 0,00070	< 0,00070
	Cr	1,6*	< 0,0076	< 0,00030	< 0,00030
	Fe	< 0,039	< 0,039	2,79 $\pm$ 0,33	1,74 $\pm$ 0,38
	Ni	55 $\pm$ 26	40 $\pm$ 12	< 0,00020	< 0,00020
	Pb	9,4 $\pm$ 6,1	< 0,056	< 0,0039	< 0,0039
	Zn	-	-	0,0039*	0,0061*

Fonte: Adaptado das fichas experimentais respondidas pelos grupos G1 e G2 (2025). *Valores de concentração sem replicata, não apresentando desvio padrão.

apresentaram medidas relativamente próximas entre si para a maioria dos analitos, considerando o intervalo de desvio padrão. Comparando esses resultados com o procedimento sugerido pelo pesquisador, pode-se observar que os valores referentes ao procedimento do grupo são consideravelmente próximos para Cr, Hg e Ni no Grupo 1, e para Cd, Hg e Ni no Grupo 2. Percebe-se uma grande disparidade nos valores de As em ambos os grupos. Essa diferença pode ser causada por uma interferência espectral isobárica quando HCl é usado durante o preparo da amostra. O ^{35}Cl , ao se ligar ao ^{40}Ar no plasma, pode formar ArCl^+ , com a mesma massa do isótopo ^{75}As (Thomas, 2013).

Quanto aos procedimentos testados na técnica ICP-OES, os grupos não conseguiram quantificar a maioria dos analitos, obtendo valores abaixo do Limite de Detecção (LD). Esse fator provocou extensas discussões na etapa de socialização sobre a sensibilidade das técnicas e a adequação de cada uma para procedimentos de determinação de elementos traço.

Categoria 5: Rotinas de Laboratório

Esta categoria se refere a todo o processo de experimentação em laboratório durante a aplicação didática, desenvolvendo principalmente habilidades práticas, mas também habilidades criativas e analíticas, especialmente durante os momentos de tomada de decisão. Os alunos consideraram a gestão de recursos e tempo, além de avaliar e resolver possíveis intercorrências, como contaminações da amostra e interferências espectrais. Os registros dos alunos indicaram que a fase experimental da AEP, assim como os momentos 3 e 4, proporcionaram uma dinâmica investigativa, estimulando o engajamento dos estudantes na realização das atividades e no aprofundamento do tema de forma crítica e reflexiva.

Categoria 6: Ensino de Química

A categoria sustenta as anteriores ao promover a formação de futuros professores por meio da problematização e da contextualização. As atividades favoreceram a resolução de problemas, estimulando os estudantes a mobilizar conhecimentos, elaborar e testar hipóteses para solucionar as questões propostas. Além disso, destaca-se a experimentação no Ensino de Química como elemento essencial para integrar teoria e prática, desenvolvendo reflexão, raciocínio lógico e pensamento crítico.

Na etapa de sistematização da AEP, os estudantes elaboraram planos de ação para compartilhar os conhecimentos adquiridos, com liberdade para desenvolver propostas de caráter extensionista. Enquanto o Grupo 2 (Material suplementar 4S) apresentou apenas um resumo da aplicação educacional, evidenciando maior valorização das atividades laboratoriais em relação às pedagógicas, o Grupo 1 desenvolveu uma proposta de extensão voltada à Mostra de Ciências da universidade, estruturando uma oficina didática interativa em quatro estações de aprendizagem (Figura 2).

Ao planejar a oficina, os estudantes refletiram sob uma perspectiva social e ambiental, incluindo em suas discussões

a análise dos impactos ecológicos e da saúde humana, bem como a reflexão sobre o papel da sociedade na busca por soluções para o problema proposto.

Teoria Substantiva: Conchas de mexilhão como bioindicadores no monitoramento ambiental

As categorias analíticas apoiaram a formulação do modelo paradigmático e, com base nele, a categoria central foi delimitada (Figura 3). Para a estruturação da teoria substantiva, foram consideradas as relações entre as categorias analíticas, além da análise rigorosa dos dados coletados durante a pesquisa. Os dados justificam a elaboração das categorias, e estas, por sua vez, apoiam a definição do fenômeno da categoria central.

A formulação do modelo paradigmático teve como objetivo responder ao problema de pesquisa que sustentou as investigações realizadas durante o estudo: “Como a estratégia teórico-metodológica contribuiu para o ensino da Química Analítica no contexto do uso de conchas de mexilhão como bioindicadores no monitoramento ambiental?”. O fenômeno da pesquisa consistiu na determinação de elementos traço em conchas de mexilhão e, a partir dela, emergiu a categoria central da teoria substantiva, indicada na Figura 3.

As condições causais envolveram a integração entre teoria e prática e considerações para a formação inicial docente, sendo reforçadas ao longo da intervenção. Adicionalmente, a experimentação em laboratório de pesquisa também se configura como uma condição causal, justificada pela ausência da disciplina “Análise Instrumental” no currículo de licenciatura em Química. Por essa razão, os licenciandos não têm contato com diversas técnicas instrumentais importantes, incluindo as espectrométricas, durante o percurso formativo.

Algumas condições intervenientes exerceram influência sobre a aplicação, como a gestão do tempo em laboratório durante os momentos 2 e 3 da AEP e a colaboração dos professores regentes da disciplina, além de experiências acadêmicas prévias dos estudantes em disciplinas correlatas, como Química Ambiental. Além disso, o entendimento equivocado de um grupo sobre o produto de sistematização também constituiu um fator interveniente.

As estratégias utilizadas compreendem o desenvolvimento de diversas atividades ao longo da AEP, visando promover competências e habilidades essenciais ao docente. De acordo com a Resolução nº 4 do CNE/CP de 2024, que orienta sobre as Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN's) para a formação inicial de professores da educação básica, o percurso formativo é um “processo dinâmico e complexo”, além de estar estreitamente ligado à qualidade da educação e o seu papel social. Assim, a formação deve ser multifacetada, integrando dimensões científicas, técnicas, estéticas e ético-políticas (Brasil, 2024).

A formação contribui para a construção de ambientes de aprendizagem que vão além do desenvolvimento cognitivo, valorizando a autonomia, a tomada de decisão e a

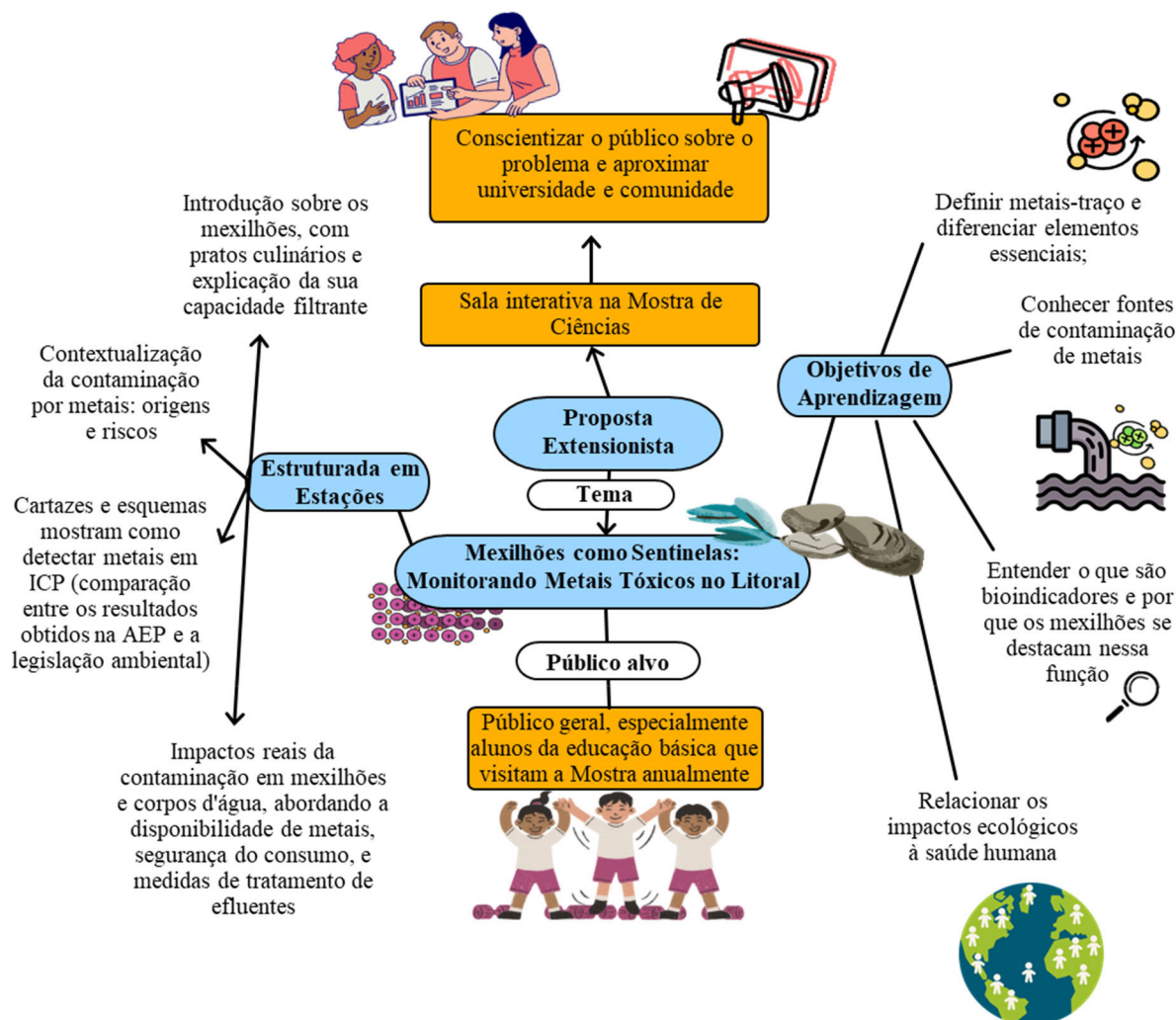


Figura 2: Mapa mental com a proposta de uma sala interativa para a Mostra de Ciências.

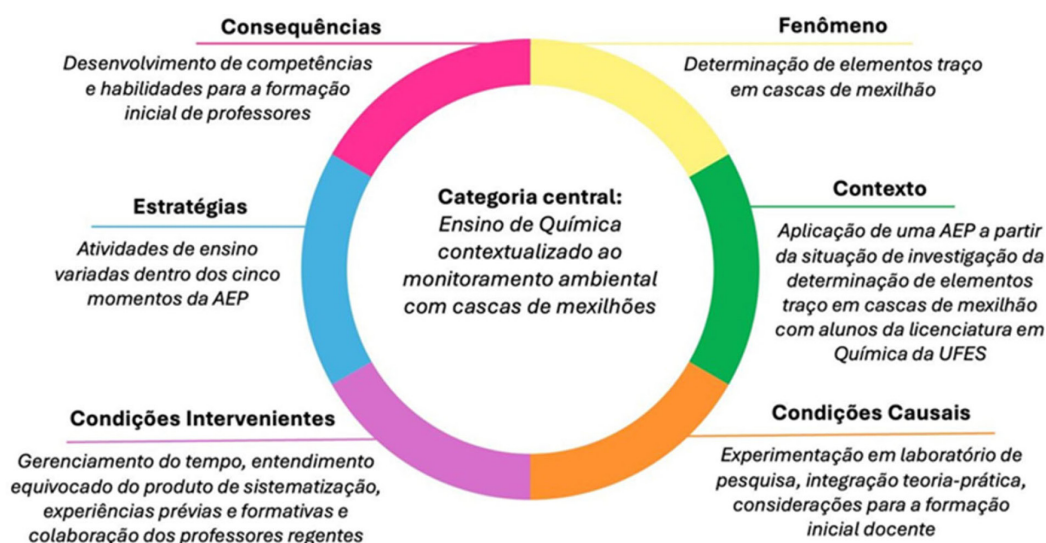


Figura 3: Modelo paradigmático e categoria central usados para desenvolver a teoria substantiva.

resolução de problemas. Essa perspectiva, combinada com a necessidade de considerar realidades educacionais diversas e o desenvolvimento profissional contínuo, reforça o papel do docente na transformação social. Incentivar a prática reflexiva promove a ressignificação do ensino, superando

abordagens tradicionais centradas no conteúdo (Sternberg e Sternberg, 2017).

Alinhada a essa perspectiva, a teoria baseada em dados qualitativos apoiou a análise da intervenção didática, destacando seu foco na formação inicial de professores de

Química em um contexto ambiental. O uso da AEP fomentou a aprendizagem colaborativa e investigativa, baseada em experimentação, reflexão e contextualização.

Como resultado, os estudantes demonstraram maior autonomia na construção do conhecimento e uma compreensão mais profunda do conteúdo estudado em conexão com aspectos sociais, culturais e econômicos. Em particular, o contexto do monitoramento ambiental ampliou a percepção dos estudantes, possibilitando a aplicação do conhecimento científico e o desenvolvimento da consciência ambiental.

Conclusões

A teoria substantiva construída neste estudo forneceu indícios de que o contexto do monitoramento ambiental, a partir da determinação de elementos traço em conchas de mexilhão, contribuiu para aquisição de conhecimento na área de química analítica. A escolha da AEP como estratégia teórico-metodológica colaborou para que o processo pedagógico dos licenciandos apresentasse um caráter mais investigativo e reflexivo, com foco na resolução de problemas. É importante destacar que, embora este estudo tenha sido realizado em uma turma de licenciatura, ele também pode ser desenvolvido com estudantes de áreas afins, como o bacharelado em Química ou em Engenharia Ambiental. O modelo paradigmático apresentou como condições causais do estudo o contato dos estudantes de graduação com laboratórios de pesquisa e a integração entre teoria e prática no processo de ensino e aprendizagem. Nesse sentido, a

abordagem dos conteúdos de química analítica envolvendo experimentos na área de espectrometria atômica proporcionou experiências que não são comumente contempladas em cursos de licenciatura em Química. Por fim, reitera-se que a escolha da AEP como abordagem pedagógica foi eficaz, favorecendo a construção do conhecimento de forma integrada e significativa, essencial no percurso formativo de professores de Química autônomos, críticos e reflexivos em sua prática docente.

Material suplementar

O material suplementar a este trabalho está disponível em https://qnesc.sbgq.org.br/online/prelo/QNEsc_60-26_MS.pdf, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

Nathalia Luiza Passamani Wyatt (nathaliaipwyatt@gmail.com) é licenciada, mestre e doutoranda em Química pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória-ES, Brasil. **Bruna Marine Damm** (bruna.damm.ufes@gmail.com) é licenciada em Química pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), mestre e doutoranda em Química pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória-ES, Brasil. **Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima** (mariacarneiro@hotmail.com) é bacharel em Química Industrial, mestre em Química e doutora em Ciências (Química Analítica Inorgânica) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Atualmente é professora titular do Departamento de Química da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória-ES, Brasil. **Paulo Rogério Garcez de Moura** (paulo.moura@ufes.br) é licenciado em Química e especialista em Educação pela Universidade de Cruz Alta, mestre em Filosofia pela Universidade Federal de Santa Maria e doutor em Educação em Ciências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é professor do Departamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, Brasil.

Referências

ADAMS, F. W. e NUNES, S. M. T. A contextualização da temática energia e a formação do pensamento sustentável no Ensino de Química. *Química Nova na Escola*, v. 44, n. 2, p. 137-148, 2022.

BACCAN, N.; ANDRADE, J. C.; GODINHO, O. E. S. e BARONE, J. S. *Quantitative elemental analysis: an analytical chemistry approach*. New York: John Wiley & Sons, 2000.

BENNION, M.; MORRISON, L.; BROPHY, D.; CARLSSON, J.; ABRAHANTES, J. C. e GRAHAM, C. T. Trace element fingerprinting of blue mussel (*Mytilus edulis*) shells and soft tissues successfully reveals harvesting locations. *Science of the Total Environment*, v. 685, n. 1, p. 50-58, 2019.

BEYER, J.; GREEN, N. W.; BROOKS, S.; ALLAN, I. J.; RUUS, A.; GOMES, T.; BRATE, I. L. N. e SCHÖYEN, M. Blue mussels (*Mytilus edulis* spp.) as sentinel organisms in coastal pollution monitoring: A review. *Marine Environmental Research*, v. 130, p. 338-365, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, 17 de março de 2005. Brasília, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Instrução Normativa nº160, 1 de julho de 2022. Brasília, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação (CNE). Resolução CNE/CP nº 4, 29 de maio de 2024. Brasília, 2024.

BRITO, A. S.; LOPES, E. T. e LIMA, M. B. Identidade docente: reflexões de professores de Química sobre a trajetória

acadêmica profissional. *Revista de Educação Pública*, v. 26, p. 63, p. 907-926, 2017.

CHAHOURI, A.; LIU, Y.; YACoubi, B.; MOUKRIM, A. e BANAOU, A. Bivalve molluscs as bioindicators of multiple stressors in the marine environment: Recent advances. *Continental Shelf Research*, v. 264, p. 1-14, 2023.

CHARMAZ, K. *The construction of grounded theory: a practical guide to qualitative analysis*. Porto Alegre: Artmed, 2009.

CHOUIKH, N.; ALAHYANE, H.; MOUNIR, A.; HACHIMI, Y. E. e CHEGGOUR, M. Trace metal bioaccumulation in *Mytilus galloprovincialis* from Essaouira protected coastal area (Atlantic coast of Morocco): Implications for marine ecosystem and human health. *Marine Pollution Bulletin*, v. 209-A, p. 1-17, 2024.

COLEMAN, N.; CASTREJON, A.; BLAINE, C. e CHEMMACHEL, T. *The toxicology of essential and nonessential metals*. Morrisville: Lulu Publishing Services, 2017.

DAMM, B. M.; GERHARD, L. F. F.; FREITAS, L. R.; ALVES, M. K. S.; GOMES JUNIOR, S. B.; LUZ, P. P.; FERREIRA, R. Q. e MOURA, P. R. G. Mel de abelhas sem ferrão: abordagem teórico-experimental contextualizada na educação superior de química. *Educación Química*, v. 36, n. 4, p. 235-247, 2025.

DEAN, J. R. *Practical Inductively Coupled Plasma Spectroscopy*. Newcastle: John Wiley & Sons, 2005.

DOMINGUES, L. A.; MAGALHÃES, C. G. e SANDRI, M. C. M. Síntese do ácido acetilsalicílico: uma proposta para

laboratórios de graduação empregando a Química Verde. *Química Nova na Escola*, v. 44, n. 2, p. 105-114, 2022.

DONNELL, A. M.; NAHAN, K.; HOLLOWAY, D. e VONDERHEIDE, P. Determination of arsenic in sinus wash and tap water by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Chemical Education*, v. 93, n. 4, p. 738-741, 2016.

EBRAHIMI, M. e TAHERIANFARD, M. The effects of heavy metals exposure on reproductive systems of cyprinid fish from Kor River. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, v. 10, p. 13-24, 2011.

FATTORINI, D. Bioaccumulation of trace elements in mussels as sentinels of environmental pollution in the Mediterranean Sea: A review. *Explora: Environment and Resource*, v. 2, n. 2, p. 1-17, 2025.

FINNE, L. T.; GAMMELGAARD, B. e CHRISTIANSEN, F. V. When the lab work disappears: students' perception of laboratory teaching for quality learning. *Journal of Chemical Education*, v. 99, n. 4, p. 1766-1774, 2022.

FORLEO, T.; ZAPPI, A.; MELUCCI, D.; CIRIACI, M.; GRIFFONI, F.; BACCHIOCCHI, S.; SIRACUSA, M.; TAVOLONI, T. e PIERSANTI, A. Inorganic elements in *Mytilus galloprovincialis* shells: geographic traceability by multivariate analysis of ICP-MS data. *Molecules*, v. 26, n. 9, p. 1-17, 2021.

KIZILKAYA, B.; YILDIZ, H.; ACARLI, S. e VURAL, P. Investigation of the chemical composition of the shell structure of *Mytilus galloprovincialis* mussel from Kefken, Türkiye. *Acta Natura et Scientia*, v. 5, n. 1, p. 57-68, 2024.

KRUG, F. J. e ROCHA, F. R. P. *Métodos de preparo de amostras para análise elementar*. São Paulo: Editora SBQ, 2016.

MARENGONI, N. G.; KLOSOWSKI, E. S.; OLIVEIRA, K. P.; CHAMBO, A. P. S. e GONÇALVES JR., A. C. Bioacumulação de metais pesados e nutrientes no mexilhão dourado do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu Binacional. *Química Nova*, v. 36, n. 3, p. 359-363, 2013.

MAXQDA ANALYTICS PRO, version 24.2.0 [software]. Berlin, Germany: VERBI, 2023.

NEWMAN, K. Using ion-molecule reaction to overcome spectral interferences in ICP-MS: a guided inquiry approach for upper-level undergraduate and graduate students. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 7, p. 1211-1215, 2018.

OLIVEIRA, C. S.; MAIA, M. L.; MORAIS, S. M. P.; DIEZ, S.; SANTOS, I. L. e PRAXEDES, A. L. F. O ensino de Química Ambiental: a experimentação como potencializadora da aprendizagem significativa sobre a temática poluição atmosférica. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 2, p. 1-19, 2024.

OLIVEIRA, L. E. S. A.; WELSING, G. L.; DAMM, B. M.; SILVA, A. L. S.; NASCIMENTO, M.; RIBEIRO, M. A. e MOURA, P. R. G. Extração do isotiocianato de benzila (BITC) no ensino de química por meio da Atividade Experimental Problematicada (AEP): possibilidade de reaproveitamento das sementes do mamão. *Química Nova*, v. 48, n. 4, p. 1-9, 2025.

PEANA, M.; PELUCELLI, A.; MEDICI, S.; CAPPAL, R.; NURCHI, V. M. e ZORODDU, M. A. Metal toxicity and

speciation: a review. *Current Medicinal Chemistry*, v. 28, n. 35, p. 7190-7208, 2021.

PILLAY, L. Simple experiment assisting students with identification of spectral interference and selection emission lines for ICP-OES analysis using soil samples. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 5, p. 1460-1464, 2020.

PINHEIRO, B. C. S.; SANTOS, C. L. e PENELUC, M. C. A educação ambiental na formação de professores de química da UFBA. *Educação & Formação*, v. 2, n. 4, p. 160-180, 2017.

ROMERO-FREIRE, A.; MARCHI, L.; FREITAS, R.; VELO, A.; BABARRO, J. M. F. e COBELO-GARCÍA, A. Ocean acidification impact on the uptake of trace elements by mussels and their biochemical effects. *Aquatic Toxicology*, v. 269, p. 1-11, 2024.

SANTOS, O. H. M.; COUTINHO, J. P.; AMORIM, F. A. C.; LÔBO, I. P.; MOREIRA, L. S.; NASCIMENTO, M. M. e JESUS, R. M. Microwave-assisted digestion using diluted HNO₃ and H₂O₂ for macro and microelements determination in guaraná samples by ICP OES. *Food Chemistry*, v. 273, n. 1, p. 159-165, 2019.

SILVA, A. L. S. e MOURA, P. R. G. *Ensino Experimental de Ciências: uma proposta. Atividade Experimental Problematicada (AEP)*. São Paulo: Livraria da Física, 2018.

SILVA, A. L. S.; MOURA, P. R. G. e SOUZA, M. L. Aproximações teóricas entre a Teoria da Inteligência Triárquica de Sternberg e a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel: uma proposta de avaliação da aprendizagem emergente da Atividade Experimental Problematicada. *Revista de Ensino de Ciências e Matemática*, v. 15, n. 2, p. 1-28, 2024.

SILVA, A. L. S.; MOURA, P. R. G. e PINO, J. C. D. Atividade Experimental Problematicada (AEP): Discussões pedagógicas e didáticas de uma asserção de sistematização voltada ao ensino experimental das ciências. *Revista Contexto e Educação*, v. 37 p. 116, p. 130-144, 2022.

SIQUEIRA, B. M. M.; SILVA, A. L. S.; FOLLI, G. S.; ROSA, T. R.; ROMÃO, W.; LELIS, M. F. F.; FILGUEIRAS, P. R. e MOURA, P. R. G. Aprendizagem da análise por componentes principais por meio da atividade experimental problematicada (AEP) com a utilização de um aplicativo de *smartphone*. *Química Nova*, v. 47, n. 5, p. 1-9, 2024.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J. e CROUCH, S. R. *Principles of Instrumental Analysis*. 6ª ed. Belmont: Cengage Learning, 2007.

STERNBERG, R. J. e STERNBERG, K. *Cognitive Psychology*. 7ª ed. Boston: Cengage Learning, 2017.

THOMAS, R. *Practical guide to ICP-MS: a tutorial for beginners*. 3ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

WELSING, G. L.; DAMM, B. M.; OLIVEIRA, L. E. S. A.; FEU, A. M. A.; ARANTES, H. T. L.; LIMA, L. C.; SILVA, A. L. S.; SOUZA, M. L.; MACHADO, M. A. e MOURA, P. R. G. Bio-oil from Piper nigrum L. crop waste as a potential biofuel and its contribution to chemistry education through problematicized experimental activity. *Journal of Chemical Education*, v. 101, n. 11, p. 4745-4755, 2024.

Abstract: *Mussel shells as bioindicators in environmental monitoring: problematicized experimental activity (PEA) in a context of initial teacher training.* Contextualized teaching approaches have been increasingly used to favor learning, often involving actions related to experimentation and problem solving. This article investigates the contributions of Problematicized Experimental Activity (PEA) in the teaching of Analytical Chemistry to undergraduate students in Chemistry. For this, the determination of trace elements in mussel shells for environmental monitoring purposes was used as context in a didactic intervention. In the mold of the Grounded Theory, a substantive theory was built based on a paradigmatic model. This model presents as a central category the "Teaching of Chemistry contextualized by the problematicization of environmental monitoring with mussel shells". The consequences of the study are contributions to the initial training of teachers in a critical and reflective way, through the development of cognitive skills and collaborative learning.

Keywords: teacher training, grounded theory, environmental monitoring