

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
INSTITUTO DE QUÍMICA  
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS  
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

KLEYFTON SOARES DA SILVA

**Efeitos das tecnologias de realidade aumentada e virtual como recursos visuoespaciais  
na aprendizagem de geometria molecular**

São Paulo

2024

KLEYFTON SOARES DA SILVA

**Efeitos das tecnologias de realidade aumentada e virtual como recursos visuoespaciais  
na aprendizagem de geometria molecular**

**Versão corrigida**

Tese apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Ensino de Química

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda  
Correia.

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

**FICHA CATALOGRÁFICA**  
**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação**  
**do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Silva, Kleyfton Soares da

Efeitos das tecnologias de realidade aumentada e virtual como recursos visuoespaciais na aprendizagem de geometria molecular. São Paulo, 2024.

Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda Correia.

Área de Concentração: Ensino de Química.

Unitermos: 1. Química - Estudo e ensino; 2. Métodos de ensino; 3. Tecnologia educacional; 4. Material didático.

USP/IF/SBI-043/2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à minha família, amigos e colegas pelo apoio que me trouxe ao sucesso acadêmico.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Correia, pelas valiosas orientações e contribuições que enriqueceram significativamente esta pesquisa.

À Universidade de Surrey (Inglaterra) e à supervisora Dra. Emily Farran, pela colaboração durante meu período de doutorado sanduíche.

À Universidade de São Paulo (USP), ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências e ao Grupo de Pesquisa Mapas Conceituais (GPMC-USP) pelo suporte acadêmico e infraestrutura necessária para a realização desta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas pela infraestrutura, apoio e oportunidades de desenvolvimento acadêmico e profissional.

Aos avaliadores do meu exame de qualificação e defesa pela análise criteriosa e sugestões construtivas que ajudaram a aprimorar o trabalho. Minha gratidão também se estende às instituições e aos participantes desta pesquisa.

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

Our brains renew themselves throughout  
life to an extent previously thought not possible.

**Michael S. Gazzaniga**

## RESUMO

SILVA, K. S. **Efeitos das tecnologias de realidade aumentada e virtual como recursos visuoespaciais na aprendizagem de geometria molecular.** 2024. Tese (Doutorado em Ciências – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Esta pesquisa investigou os efeitos de intervenções didáticas mediadas por tecnologias de Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV) na aprendizagem de noções de geometria molecular. Diante da complexidade atrelada à aprendizagem da estrutura molecular, esta investigação coloca os erros conceituais, a questão visuoespacial e a utilização de tecnologias digitais como elementos importantes para a elaboração de estratégias didáticas eficazes. A partir de uma abordagem quanti-qualitativa de natureza aplicada e uma estratégia de coleta e análise de dados sequencial explicativa de métodos mistos, a pesquisa foi organizada em três estudos complementares. O primeiro estudo teve como objetivo identificar erros conceituais relacionados à geometria molecular através de um teste diagnóstico aplicado a 55 estudantes de graduação em biotecnologia da Universidade de São Paulo. Os resultados revelaram dificuldades na transição entre representações bidimensionais e tridimensionais, enfatizando a necessidade de estratégias didáticas com múltiplas representações. O segundo estudo, conduzido com os mesmos participantes do estudo I, avaliou o efeito da RA na aprendizagem de geometria molecular. Os estudantes foram divididos em dois grupos: um revisou o assunto com o apoio de um mapa conceitual com moléculas estáticas (grupo A) e o outro com um mapa conceitual personalizado com RA (grupo B). A comparação do desempenho na tarefa de construção de moléculas físicas mostrou um resultado superior para o grupo B, sugerindo que fatores emocionais e de atenção podem ter contribuído para uma boa percepção espacial das moléculas. O terceiro estudo, conduzido na Universidade de Surrey (Inglaterra), avaliou o efeito da RV, complementada com outros recursos, na compreensão de geometria molecular. O referido estudo destacou o conjunto de tarefas da intervenção didática como engajador, propiciando a aprendizagem independentemente do nível de conhecimento prévio dos estudantes, além de ser eficaz em nivelar o conhecimento entre diferentes grupos. As conclusões dos estudos enfatizam a relevância de testes diagnósticos para identificar erros conceituais e a importância de integrar tecnologias imersivas e atividades práticas no ensino de química. Os achados reforçam a necessidade de estratégias didáticas cuidadosamente planejadas, implementadas e avaliadas para potencializar o desempenho em contextos educacionais de química.

Palavras-chave: Ensino de química. Erros conceituais. Mapas conceituais. Tecnologias digitais emergentes.

## ABSTRACT

SILVA, K. S. **Effects of augmented and virtual reality technologies as visuospatial resources in molecular geometry learning.** 2024. Tese (Doutorado em Ciências – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

This research investigated the effects of didactic interventions mediated by augmented reality (AR) and virtual reality (VR) technologies on the learning of molecular geometry concepts. Given the complexity associated with learning molecular structure, this investigation identifies conceptual errors, visuospatial issues, and the use of digital technologies as important elements for developing effective didactic strategies. Utilizing a qualitative and quantitative, applied approach and an explanatory sequential mixed methods data collection and analysis strategy, the research was organized into three complementary studies. The first study aimed to identify conceptual errors related to molecular geometry through a diagnostic test applied to 55 undergraduate biotechnology students at the University of São Paulo. The results revealed difficulties in transitioning between two-dimensional and three-dimensional representations, emphasizing the need for didactic strategies with multiple representations. The second study, conducted with the same participants from study I, assessed the effect of AR on learning molecular geometry. Students were divided into two groups: one reviewed the subject with the support of a conceptual map with static molecules (group A) and the other with a customized conceptual map with AR (group B). The comparison of performance in the task of constructing physical molecules showed superior performance for group B, suggesting that emotional and attention factors may have contributed to a good spatial perception of the molecules. The third study, conducted at the University of Surrey, evaluated the effect of VR, complemented with other resources, on the understanding of molecular geometry. This study highlighted the set of tasks in the pedagogical intervention as engaging, facilitating learning regardless of students' prior knowledge level, and effective in leveling knowledge among different groups. The study conclusions emphasize the relevance of diagnostic tests to identify conceptual errors and the importance of integrating immersive technologies and practical activities in chemistry education. The findings reinforce the need for carefully planned, implemented, and evaluated didactic strategies to enhance performance in chemistry educational contexts.

**Keywords:** Chemistry teaching. Conceptual errors. Concept maps. Emerging digital technologies.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Número de citações e publicações ao longo do tempo .....	31
Figura 2 – Quantidade de trabalhos defendidos por ano (catálogo de dissertações e teses CAPES)....	34
Figura 3 – Distribuição percentual dos 34 trabalhos sobre estratégias didáticas .....	41
Figura 4 – O que é um mapa conceitual? Fonte: Adaptado de Silva, Fonseca e Correia (2020) .....	53
Figura 5 – Mapa conceitual utilizado na entrevista docente – o que é geometria molecular? .....	55
Figura 6 – Conceitos abordados pelo docente A realçados em verde. Destaque para o conceito considerado essencial para a compreensão da noção de geometria molecular.....	57
Figura 7 – Conceitos abordados pela docente B realçados em azul. Destaque para o conceito considerado essencial para a compreensão da noção de geometria molecular.....	59
Figura 8 – Mapa conceitual construído colaborativamente – Conceitos realçados de acordo com as sugestões dos docentes A (verde) e B (azul).....	62
Figura 9 – Mapa conceitual que responde à pergunta focal “Quais são os principais elementos de um MC e suas relações?.....	66
Figura 10 – Principais áreas envolvidas no processamento da atenção .....	70
Figura 11 – Exemplo da aplicação de erros em MC sobre propriedades da matéria. As marcações em vermelho mostram os erros que deverão ser encontrados e corrigidos pelos alunos, que recebem mapas em preto e branco. ....	72
Figura 12 – Exemplo da aplicação de lacunas em MC sobre propriedades da matéria. As marcações em vermelho mostram as lacunas que deverão ser preenchidas alunos. ....	74
Figura 13 – Exemplo da aplicação de figuras/ícones em MC sobre propriedades da matéria. Os ícones mostram as possíveis disposições espaciais que deverão ser identificadas e associadas ao conteúdo..	75
Figura 14 – Exemplo da aplicação de cores/contrastes em MC sobre propriedades da matéria. As cores setorizam as categorias que complementam o conteúdo.....	77
Figura 15 – Mapa conceitual síntese de um texto sobre o descarte de pilhas e baterias. O aluno foi instruído, em 5 minutos, sobre como construir um mapa conceitual (noções de hierarquia, conceitos e termos de ligação). ....	81
Figura 16 – Mapa conceitual produzido para revisão e introdução de tópicos de química (substância e matéria, respectivamente).....	82
Figura 17 – Mapa conceitual “Como os estudos I, II e III se relacionam com as investigações preliminares?” .....	86
Figura 18 – a) molécula com disposição espacial inapropriada; b) molécula com disposição espacial apropriada.....	98

Figura 19 – a) Nuvem de palavras de 31 respostas dissertativas avaliadas como corretas; b) Nuvem de palavras de 24 respostas dissertativas avaliadas como incorretas .....	100
Figura 20 – a) Desenhos de XeF <sub>4</sub> feitos por quatro estudantes; b) Desenhos de XeF <sub>4</sub> e CH <sub>4</sub> feitos por três estudantes .....	101
Figura 21 – a) diferentes representações da água b) diferentes representações da geometria molecular .....	108
Figura 22 – Design experimental para avaliar a percepção espacial dos estudantes.....	115
Figura 23 – Demonstração da interação do estudante com o mapa conceitual por meio de um aplicativo de realidade aumentada .....	116
Figura 24 – Demonstração de todas as moléculas que o aplicativo de realidade aumentada pode revelar. ....	117
Figura 25 – Concepções sobre a importância da geometria molecular .....	122
Figura 26 – Cenário de realidade virtual construído para estudar geometria molecular .....	134
Figura 27 – Frequência de acertos em cada questão de múltipla escolha do pré-teste e pós-teste.....	139
Figura 28 – Frequência de acertos em cada questão aberta (justificativa) do pré-teste e pós-teste ....	139
Figura 29 – Resultado da avaliação do questionário de satisfação acerca da intervenção didática ....	144

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Lista dos artigos internacionais consultados (n=21) a partir de dados da Web of Science (2022).....	30
Quadro 2 – Lista das 18 dissertações e 1 tese consultadas no catálogo de dissertações e teses CAPES .....	33
Quadro 3 – Lista de artigos nacionais (n=6) consultados pelo Periódicos CAPES .....	35
Quadro 4 – Classificação das obras por enfoque teórico-metodológico .....	35
Quadro 5 – Relação dos principais erros conceituais relacionados à geometria molecular .....	40
Quadro 6 – Exemplos de mapas conceituais que consideram alguns princípios da atenção. Mostram apenas as estruturas que atendem às expectativas dos respectivos tipos de mapa. TL = termo de ligação. ....	78
Quadro 7 – Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias	96
Quadro 8 – Visão geral dos processos envolvidos na aprendizagem com múltiplas representações visuais e competências resultantes .....	110
Quadro 9 – Exemplos de moléculas construídas pelos estudantes e pontuação obtida.....	113
Quadro 10 – Exemplos das respostas apresentadas.....	123
Quadro 11 – Exemplos das respostas apresentadas.....	123
Quadro 12 – Exemplos das respostas apresentadas.....	124
Quadro 13 – Exemplos das respostas apresentadas.....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critério de avaliação das questões do teste diagnóstico sobre geometria molecular – Adaptado de Özmen, Demircioglu e Demircioglu (2008).....	95
Tabela 2 – Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias.	95
Tabela 3 – Comparação de médias entre os grupos A (sem realidade aumentada) e B (com realidade aumentada) .....	118
Tabela 4 – Comparação de médias entre os grupos A (sem realidade aumentada) e B (com realidade aumentada) .....	118
Tabela 5 – U de Mann-Whitney para o pré-teste e pós-teste sobre geometria molecular .....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
NSF	National Science Foundation
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
DCNEM	Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
PNLD	Programa Nacional do Livro e do Material Didático
EDEQ	Encontro de Debates em Ensino de Química
SBQ	Sociedade Brasileira de Química
MC	Mapa Conceitual
TCC	Teoria da Carga Cognitiva
TRPECV	Teoria da Repulsão dos Pares de Elétrons da Camada de Valência
MOODLE	Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
CAMIL	Cognitive Affective Model of Immersive Learning
PVRT	Teste de Visualização de Rotações de Purdue

## SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO .....	13
1.1 A didática dos saberes químicos: um breve histórico .....	15
2 EXPLORANDO POSSIBILIDADES DE INVESTIGAÇÕES E PRÁTICAS RELACIONADAS À APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR.....	25
2.1 Ensino e aprendizagem de geometria molecular: uma revisão sistemática da literatura.....	25
2.1.1 Introdução.....	26
2.1.2 Metodologia .....	27
2.1.3 Apresentação da literatura internacional e do mecanismo de categorização dos estudos ....	30
2.1.4 Apresentação da literatura nacional (catálogo de dissertações e teses; periódicos CAPES)	33
2.1.5 Análise de todas as obras consultadas por categoria.....	35
2.1.5.1 Habilidades espaciais .....	36
2.1.5.2 Relação estrutura-propriedade.....	38
2.1.5.3 Diagnóstico de erros conceituais.....	39
2.1.5.4 Estratégias didáticas .....	40
2.1.6 Discussão, conclusões e implicações .....	45
2.2 Perspectiva docente acerca da aprendizagem de geometria molecular: análise de entrevista mediada com mapa conceitual .....	48
2.2.1 Introdução.....	49
2.2.2 O ensino de geometria molecular .....	50
2.2.3 Mapa conceitual como instrumento de pesquisa .....	52
2.2.4 Metodologia .....	54
2.2.5 Resultados e discussão .....	56
2.2.5.1 Docente A.....	56
2.2.5.2 Docente B.....	59
2.2.5.3 O mapa conceitual colaborativo .....	61
2.2.6 Considerações finais.....	63
2.3 Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais.....	64
2.3.1 Introdução.....	64
2.3.2 Noções e aplicações do mapa conceitual .....	66
2.3.3 Processos atencionais .....	68
2.3.4 Relação entre a aprendizagem por mapas conceituais e os processos atencionais.....	71
2.3.4.1 Mapa com erros.....	71

2.3.4.2	Mapa com lacunas.....	73
2.3.4.3	Mapa com figuras/ícones .....	74
2.3.4.4	Mapa com cores/contrastes .....	76
2.3.4.5	Quadro resumo dos tipos de mapas discutidos.....	77
2.3.5	A Teoria da Carga Cognitiva e a elaboração de materiais instrucionais .....	78
2.3.5.1	As noções da atenção e da carga cognitiva na prática.....	80
2.3.6	Considerações finais.....	83
3	DESENHO METODOLÓGICO .....	85
3.1	Objetivos geral e específicos.....	85
3.1.1	Objetivo geral.....	85
3.1.2	Objetivos específicos.....	85
3.2	Organização dos estudos .....	86
3.3	Garantias éticas .....	88
4	CONTEXTOS, MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ESTUDOS I, II e III.....	89
4.1	Estudo I: Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular.....	89
4.1.1	Introdução.....	89
4.1.2	Erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular .....	91
4.1.3	Metodologia .....	93
4.1.3.1	Elaboração, validação e confiabilidade do instrumento de coleta e análise de dados... ..	94
4.1.4	Resultados e discussão .....	95
4.1.4.1	Representação tridimensional.....	97
4.1.4.2	Relação estrutura de Lewis – geometria molecular.....	99
4.1.4.3	Relação estrutura-propriedade.....	101
4.1.4.4	Relação estrutura-hibridização .....	102
4.1.4.5	Repulsão eletrônica .....	103
4.1.4.6	Relação eletronegatividade-repulsão eletrônica.....	104
4.1.5	Conclusões e implicações.....	104
4.2	Estudo II: Aprimorando a percepção espacial em geometria molecular através do estudo com mapas conceituais e tecnologia de realidade aumentada.....	105
4.2.1	Introdução.....	106
4.2.2	As representações visuais em química .....	107
4.2.3	Metodologia .....	111
4.2.3.1	Instrumentos de intervenção didática e coleta de dados.....	112

4.2.3.2 Organização dos dados e métodos de análise.....	112
4.2.3.3 O desenvolvimento do aplicativo de realidade aumentada .....	115
4.2.4 Resultados e discussão .....	118
4.2.5 Considerações finais.....	121
4.2.6 Análise complementar: perspectivas dos estudantes acerca da importância do estudo da geometria molecular .....	122
4.3 Estudo III: Aprimorando a aprendizagem de geometria molecular por meio de intervenções com realidade virtual: efeitos em estudantes com diferentes níveis de conhecimento prévio .....	125
4.3.1 Introdução.....	125
4.3.2 Visualização em química e tecnologia de realidade virtual .....	126
4.3.3 Metodologia .....	131
4.3.3.1 Desenho experimental .....	131
4.3.3.2 Intervenção .....	133
4.3.4 Resultados e discussão .....	134
4.3.4.1 Relação entre teste de rotação mental e conhecimentos prévios (pré-teste).....	134
4.3.4.2 Antes e após a intervenção .....	135
4.3.4.3 Análise das questões do pré-teste e pós-teste .....	139
4.3.4.4 Estratégias empregadas pelos participantes durante a tarefa imersiva com realidade virtual .....	142
4.3.4.5 Tarefa de montagem de moléculas .....	143
4.3.4.6 Questionário de satisfação.....	143
4.3.5 Considerações finais.....	145
5 CONCLUSÃO DA TESE .....	147
REFERÊNCIAS .....	150
APÊNDICES .....	167
ANEXOS.....	190

## 1 APRESENTAÇÃO

Aprender química no Ensino Médio tem sido uma tarefa desafiadora. Os conceitos científicos acompanham diferentes modelos/representações e podem ser complexos para serem bem compreendidos. Assim, durante o processo de aprendizagem, os estudantes podem se sentir desmotivados e obterem desempenho escolar insatisfatório (Silva, 2018). Do ponto de vista dos educadores e pesquisadores, a superação das dificuldades de aprendizagem passa, portanto, pelo estudo das especificidades da disciplina (química) e das questões cognitivas associadas à aquisição e aplicação de conhecimentos (Astolfi; Develay, 1990). Para situar o objeto desta pesquisa no contexto das dificuldades de aprendizagem em química, trago um pouco da minha história acadêmica.

Escolhi ser professor de química principalmente porque eu gostava da química do Ensino Médio. Eu era atraído pelos experimentos e teorias que explicam os fenômenos da natureza. Comecei o curso superior de licenciatura e tive muitas dificuldades para avançar nos estudos. Foi um período difícil, parecia que nada que eu havia aprendido anteriormente me servia no nível superior. No primeiro ano cursei três disciplinas de química, incluindo aulas de laboratório, mas eu ainda não havia encontrado sentido no que fazia. Faltava alguma coisa, eu sabia que estava utilizando estratégias mnemônicas o tempo todo. Eu certamente não aprendia significativamente.

No terceiro período do curso comecei a ter aula de química orgânica. Certo dia o professor levou uma ferramenta educacional que mudou totalmente a minha concepção sobre a aprendizagem de química. Por que aquele kit de modelo molecular físico fez tanta diferença na minha vida? Por que a imagem do professor manipulando aquelas moléculas não sai da minha cabeça?

Estranhamente, ainda não havia me dado conta de que as propriedades das substâncias são explicadas com base nas suas estruturas. Afinal, é para isso que estudamos a estrutura atômica e molecular. Era como se eu não enxergasse bem. Aquela aula do professor não me fez abrir os olhos somente para o conteúdo de geometria molecular, para além disso, a química passou a fazer sentido para mim. Passei a estudar com outro olhar e mais motivação, agora eu sabia o que estava buscando. Minha paixão por moléculas me trouxe até o tema desta pesquisa de doutorado.

Eventos como os relatados acima me fazem refletir acerca das dificuldades de aprendizagem que os estudantes enfrentam. De quem é a “culpa”? Em busca de respostas,

comecei a pesquisar os fatores que impactam positivamente e negativamente a aprendizagem de química. A minha experiência pessoal e profissional em relação ao estudo da geometria molecular me fez escolher esse saber como objeto de investigação de fenômenos de aprendizagem.

A história desta pesquisa de doutorado começa com a minha investigação sobre aprendizagem de geometria molecular no âmbito do mestrado. Comecei pesquisando a epistemologia do conceito “geometria molecular” a partir da história do seu desenvolvimento (Silva; Fonseca; Freitas, 2018). Em seguida, investiguei os efeitos de estratégias didáticas<sup>1</sup> multissensoriais, resultando em outra contribuição importante para a área (Silva; Fonseca, 2021). Para buscar respostas acerca da dificuldade de aprendizagem do saber em tela, em nível institucional, pesquisei a organização praxeológica em documentos oficiais e livros didáticos (Silva *et al.*, 2020).

A exploração do campo da aprendizagem em geometria molecular está longe de ser exaustiva, uma vez que ainda há questões inexploradas. Uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) destacou duas oportunidades interessantes para avançar nessa temática. Primeiramente, é crucial identificar os erros conceituais dos alunos, uma etapa essencial para o desenvolvimento de materiais instrucionais mais efetivos. Em segundo lugar, o uso de ferramentas digitais para visualizar estruturas moleculares está ganhando força. Esse interesse é sobretudo potencializado pela introdução de tecnologias inovadoras como a realidade aumentada (Silva; Correia, 2023b).

Considerando as oportunidades de investigação citadas, a pesquisa foi estrategicamente dividida em três estudos principais distintos, porém conectados, com o objetivo comum de "explorar o impacto de intervenções didáticas mediadas por tecnologias realidade aumentada e virtual na aprendizagem de geometria molecular". A pergunta que guiou todo o processo investigativo desta pesquisa foi: Quais efeitos os recursos visuoespaciais com realidade aumentada e virtual têm na aprendizagem de geometria molecular? Baseando-se em evidências científicas, esta pesquisa de doutorado defende que os impactos das tecnologias de realidade aumentada e virtual na aprendizagem de geometria molecular são significativamente influenciados pelo método instrucional adotado, considerando-se as características específicas do conteúdo abordado, bem como fatores tecnológicos e psicológicos envolvidos.

---

<sup>1</sup> Em vez de chamar de estratégia didático-pedagógica (Pereira; Cunha; Lima, 2020), os termos “estratégia didática” e “estratégia pedagógica” foram utilizados de forma intercambiável e representam um conjunto de ações didático-pedagógicas para atender aos objetivos visados pelo ensino.

Para responder à questão, adotou-se uma abordagem interpretativa, buscando compreender conceitos, percepções, experiências e significados relacionados ao tema. A pesquisa contempla três investigações exploratórias (seção 2) que nortearam o planejamento e condução das três investigações/estudos principais (seção 4). Em alinhamento com as ideias de formato alternativo de tese (Duck; Beck, 1999) e tese em estilo de manuscrito/artigo (Anderson; Saunders; Alexander, 2022), essa configuração proporcionou a produção de seis artigos científicos, cujo objetivo foi tornar os resultados acessíveis à comunidade o mais cedo possível, beneficiando-se de feedback construtivo – por meio das contribuições dos pareceristas – ao longo do processo de doutoramento. Embora as três investigações exploratórias apresentem objetivos específicos, considerou-se, para efeito de resposta à pergunta da tese, os objetivos específicos das investigações principais.

Portanto, essa estratégia enriqueceu o processo de investigação e orientou a configuração textual da tese. Para preservar a integridade e o formato original dos artigos submetidos e/ou publicados, as seções correspondentes são apresentadas conforme aparecem nos artigos, incluindo títulos, resumos, introduções, fundamentos teóricos específicos, metodologias, resultados e considerações finais. As referências bibliográficas, por sua vez, estão todas compiladas no final do documento.

## 1.1 A DIDÁTICA DOS SABERES QUÍMICOS: UM BREVE HISTÓRICO

O ensino de química tem sido palco de discussões importantes para o aprimoramento de estratégias didáticas visando uma formação crítica e reflexiva. Nos últimos anos, esforços têm sido empreendidos para a compreensão de uma ciência a ser ensinada para todos. Isso porque os objetivos de quem faz ciência não estão necessariamente associados aos objetivos de quem as aplicam em diferentes contextos. Hurd (1998) ressalta que em 1970 o Comitê Consultivo da *National Science Foundation (NSF)* para Educação em Ciências perspectivava um currículo com ênfase na compreensão da ciência e tecnologia por estudantes que não necessariamente se tornariam cientistas. Nesse sentido, como o ensino de ciências ou, mais especificamente, de química, pode ser levado a cabo, de modo que os conhecimentos adquiridos possam ser úteis para a maioria dos estudantes que não pensam em se tornar profissionais pesquisadores?

No cenário internacional, a preocupação com questões de ensino de química se tornou mais expressiva na década de 1960, a partir da necessidade de reestruturação dos currículos de ensino dos Estados Unidos e Inglaterra, em oposição aos métodos tradicionais do ensino de

química, biologia e física (Schnetzler, 2002). As pesquisas eram conduzidas, em sua maioria, pelo método quantitativo e os pesquisadores passaram a investigar questões mais direcionadas aos saberes específicos, questionando-se quanto à natureza do conhecimento científico e aos objetivos do ensino e aprendizagem de ciências. Com o passar dos anos, os métodos de investigação em didática das ciências transitaram entre quantitativo, misto e qualitativo, até se consolidar, quase exclusivamente, nesse último, a partir da década de 90 (Adúriz-Bravo, 2000). Vale frisar que, em termos de embasamento teórico, prevalecem os modelos construtivistas.

Com o olhar para a natureza do conhecimento científico e sua importância para a formação de cidadãos letrados – cientificamente falando – e potenciais transformadores da sociedade, desde 1958, quando Paul Hurd primeiro utilizou o termo *scientific literacy* em seu livro “*Science Literacy: Its Meaning for American Schools*”, pesquisadores têm voltado a atenção para a questão da alfabetização científica (Sasseron; Carvalho, 2011).

Para Hurd (1998, p. 410, tradução minha), a alfabetização científica “é vista como uma competência cívica necessária para o pensamento racional sobre a ciência em relação a problemas pessoais, sociais, políticos, econômicos e questões que provavelmente alguém encontrará ao longo da vida”. A educação em ciências/química não deve estar centrada no acúmulo de conhecimentos isolados e desconectados da realidade social, científica e tecnológica a qual estamos inseridos. Trata-se de um ensino por meio de “atividades problematizadoras, cujas temáticas sejam capazes de relacionar e conciliar diferentes áreas e esferas da vida de todos nós, ambicionando olhar para as ciências e seus produtos como elementos presentes em nosso dia-a-dia [...]” (Sasseron; Carvalho, 2011, p. 66).

A alfabetização científica enquanto objetivo didático se soma à institucionalização do campo de pesquisa “ensino de química”, na medida em que o conjunto de conhecimentos visados pelo ensino pode ser estruturado a partir da dialética envolvendo seus aspectos epistemológicos, psicológicos e pedagógicos, dentro de contextos socioculturais específicos. É pertinente destacar que o campo de pesquisa em questão é marcado pela especificidade do conhecimento científico, “[...] implicando pesquisas sobre métodos didáticos mais adequados ao ensino daquele conhecimento e investigações sobre processos que melhor deem conta de necessárias reelaborações conceituais ou transposições didáticas [...]” (Schnetzler, 2002, p. 2). Assim, considerando que as questões do ensino de química lidam não só com aspectos didáticos e metodológicos gerais, verifica-se que os discursos do ensino de química e da alfabetização científica são indissociáveis.

Em alinhamento com os pressupostos da alfabetização científica, começa a se difundir, a partir do final da década de 1970, o movimento das relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), justificado pela observância dos impactos dos avanços científicos e tecnológicos na sociedade “[...] e, portanto, na vida das pessoas, colocando a necessidade de os alunos adquirirem conhecimentos científicos que os levem a participar como cidadãos na sociedade, de forma ativa e crítica, pela tomada de decisões” (Schnetzler, 2002, p. 16).

Essa visão integradora da ciência e tecnologia corrobora com o que Hurd destacou acerca da emergência de uma nova educação em ciências,

A educação em ciências assume novas dimensões com a mudança da imagem da ciência/tecnologia, uma cultura em rápida mudança e uma era de conhecimento intensivo. Os seres humanos são o único organismo vivo cuja capacidade adaptativa é principalmente aprendida. O nível de capacidade de usar avanços em ciência/tecnologia para melhorar vários aspectos de sua vida agora é visto como um “capital humano”. Nesse contexto, a alfabetização científica representa as capacidades cognitivas para a utilização da informação da ciência/tecnologia nas questões humanas e para o progresso social e econômico. (Hurd, 1998, p. 411, tradução minha)

Outro movimento importante que tem sido difundido com objetivo de alavancar a motivação e o desempenho acadêmico em direção às ciências está relacionado à abordagem do Ensino pela História e Filosofia das Ciências. Matthews (1995) enfatiza que os programas de CTS propiciam a integração de elementos históricos e filosóficos das ciências para dar mais consistência e significado ao que está sendo ensinado e aprendido. Para o mesmo autor, o ensino de ciências pela história e filosofia não resolve todos os problemas da crise do ensino contemporâneo de ciências, mas traz algumas respostas importantes, uma vez que:

podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como do espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas. (Matthews, 1995, p. 165)

As ideias que circundam a nova forma de olhar para o ensino de ciências se opõem ao modelo indutivista de fazer e ensinar ciências, visto que o espelho das conquistas científicas e tecnológicas, ao longo da história, tem refletido certa contaminação da observação pelos interesses teóricos e/ou práticos dos investigadores. Em outras palavras, tem-se que é

impossível observar os fatos imparcialmente, mas a partir de um prisma teórico e instrumental pré-estabelecido. Além disso, há empreendimentos científicos em que não há necessidade ou possibilidade de coleta de dados a partir de observações diretas. Com isso, a ciência a ser ensinada defendida por Hodson (1988) inclui o estudo da linguagem científica, do que é ou não ciência, da estrutura substantiva da ciência, do desenvolvimento e história das ideias científicas.

Não se pode negar que quando se fala de química é inevitável pensar na experimentação. Hodson (1988) destaca que é comum haver confusão em currículos escolares e concepções de educadores de ciências, quando sugerem a experimentação de bancada de laboratório como a alternativa mais promissora para aprender ciência. No entanto, a ênfase na experimentação enquanto comprovação teórica por si só não traz vantagens à aprendizagem de aspectos científicos importantes.

A experimentação faz parte do contexto de quem ensina e aprende química, devendo ser, portanto, planejada e implementada com cautela. Conforme mencionado, os objetivos educativos precisam estar alinhados com as finalidades da alfabetização científica. Educar cientificamente para quê? Quando utilizar experimentos para aprender conceitos e/ou comprovar leis e teorias? Quando experimentar para aprender procedimentos de laboratório? Quando experimentar para aprender sobre ciência? Quando experimentar para aprender a refletir e a buscar soluções para problemas da sociedade? Tais questões dão uma dimensão da complexidade que a experimentação pode alcançar, sem mencionar as diversas possibilidades didáticas e metodológicas para a sua execução.

A sugestão de Hodson (1988) para a educação em ciências parte do entendimento das noções e diferenças do aprender ciência, aprender sobre ciência, e fazer ciência. Para ele, não se pode perder de vista os objetivos de cada atividade pedagógica, de modo que os professores possam identificar “os objetivos de cada aula em particular [...] e selecionar métodos ativos de aprendizagem, inclusive trabalhos de laboratório, apropriados a esses objetivos individuais” (Hodson, 1988, p. 18). Com isso, as práticas experimentais podem ser alternativas adequadas de acordo com os objetivos de aprendizagem definidos.

Especificamente em cenários de aprendizagem de química, Johnstone (1993) identificou que a aquisição de conhecimentos relativos aos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico são imprescindíveis para o entendimento da referida disciplina. O nível macroscópico se refere ao mundo observável, palpável, enquanto o submicroscópico está para o mundo das partículas. Já o nível simbólico está relacionado às representações da linguagem

científica. Dessa forma, as abordagens em sala de aula precisam levar em consideração o equilíbrio entre os elementos dessa tríade.

Percebe-se que o contexto da experimentação é pertinente para o trabalho dentro do domínio macroscópico, submicroscópico e simbólico da química, uma vez que lida com aspectos observáveis, teóricos e representacionais. No entanto, vale destacar que a compreensão de fenômenos químicos nem sempre é alcançada por meio da observação direta e relação imediata com conceitos, princípios, leis e teorias. Na verdade, seria inviável reproduzir em sala de aula ou laboratório de química os aparatos utilizados pelos pesquisadores para descobrirem a estrutura atômica, por exemplo. Assim, o estudo de modelos e simbologias permitem os estudantes construir um entendimento válido dentro do contexto estudado. E isso é uma especificidade da química, muitas vezes reportada como “abstração”.

No entanto, como e quando propiciar mudanças no sentido de atender às expectativas desse olhar para o ensino de química? As implicações das discussões acerca do ensino de ciências refletiram significativamente no currículo escolar brasileiro. Com a reforma educacional brasileira, impulsionada pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional – LDB (Brasil, 1996), Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio – DCNEM (Brasil, 1998) e Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN (Brasil, 1999) foram elaborados para tratar dos objetivos educacionais que organizam o aprendizado nas escolas.

O ensino de ciências da natureza, segundo os PCN (Brasil, 1999), estão alicerçados em três pilares: representação e comunicação; investigação e compreensão; e contextualização sociocultural. Nota-se que há um apelo a abordagens metodológicas envolvendo a interdisciplinaridade e contextualização para o desenvolvimento de competências e habilidades que permitam aos estudantes pensar criticamente e atuar em sociedade com uma perspectiva transformadora.

Embora currículos escolares do Brasil tenham sido orientados pelos documentos citados, atualmente, as dificuldades que potencializaram o movimento de mudança no itinerário formativo de ciências no âmbito internacional parecem estar latentes na realidade escolar brasileira. Em 1998, Hurd apontou que “a maioria dos currículos de ciências encontrados nas escolas hoje é descritiva, com foco nas leis, teorias e conceitos de disciplinas presumivelmente discretas (Hurd, 1998, p. 411, tradução minha). Porém, os desafios relativos ao ensino de ciências persistem:

Existem as questões relacionadas ao tipo de aulas, aquelas atreladas ao modelo expositivo; à falta de infraestrutura adequada, sobretudo de laboratórios; à falta de professores devidamente formados; à ausência de interesse do

estudante por esta disciplina; os baixos resultados em avaliações internacionais, como no Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA), entre outros. (Garcia; Sá; Lima, 2020, p. 389)

No contexto atual, o sistema educacional brasileiro tem passado por adaptações importantes desde a homologação do documento da nova Base Nacional Comum Curricular (BNCC), em 2018 (Brasil, 2018). No contexto do ensino de química para a etapa do Ensino Médio, o documento elenca 26 habilidades distribuídas em 3 competências específicas referentes à área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias – Química, Física e Biologia. Assim, as novidades da BNCC trouxeram desafios como a elaboração e implementação de novos currículos pelas instituições escolares (Arnaud; Fernandez, 2022) e a produção de livros didáticos pelas editoras.

Por exemplo, os livros didáticos específicos – antes produzidos por disciplina – foram organizados por área do conhecimento e incluíram conteúdos referentes às aprendizagens essenciais destacadas pela BNCC, em forma de competências e habilidades a serem alcançadas a partir de um ensino contextual, interdisciplinar e ligado às ciências, tecnologias, sociedade, meio ambiente e mercado de trabalho. Em meio às dúvidas quanto aos conteúdos de química a serem ensinados, muito interessa aos educadores saber quais conteúdos estão sendo considerados nos currículos escolares e livros didáticos.

O problema é que o documento da BNCC não sugere conteúdo mínimo, mas aprendizagens essenciais que deverão ser comuns em âmbito nacional. Assim, a sugestão de tópicos genéricos como “estrutura da matéria” abriu espaço para dúvidas quanto à abordagem opcional ou mandatória de conceitos importantes. Em pesquisa acerca dos conteúdos químicos nos currículos estaduais atualizados depois da BNCC, Arnaud e Fernandez (2022, p. 7) observaram que “alguns conteúdos considerados clássicos e que eram apresentados frequentemente nos documentos oficiais agora aparecem de forma tímida em apenas alguns currículos”. Geometria molecular, gases e isomeria são alguns dos conteúdos não contemplados em alguns currículos analisados.

Quanto aos livros didáticos aprovados no Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD) de 2021, verificou-se que os principais conteúdos de química não foram excluídos do livro, embora alguns não tenham sido explicitados na BNCC. Porém, a redução de conteúdo é preocupante e precisa ser analisada com profundidade. Há um movimento integrador, interdisciplinar e contextual importante do ponto de vista dos objetivos visados pela BNCC, mas os reais impactos do enxugamento de noções científicas sobre a aprendizagem de ciências precisam ser estudados. Vale ressaltar que, ainda que o livro didático não deva ser a

fonte primária para o planejamento do ensino, entende-se que ele acaba norteando as práticas em sala de aula. De acordo com Bittar (2017, p. 365), “se queremos compreender algumas das razões de dificuldades de aprendizagem enfrentadas por alunos, o livro didático utilizado por eles é uma das fontes a serem consultadas”.

As dificuldades para superação dos desafios ainda existentes mostram que não há apenas questões de ordem pedagógicas envolvidas nesse processo, mas também políticas e econômicas. A promulgação de documentos oficiais é uma conquista importante, uma vez que institui por meio de diretrizes e parâmetros o que deve ser feito, baseados em discussões e pesquisas conduzidas por especialistas da área. No entanto, a implementação de mudanças depende, em grande parte, do êxito quanto aos interesses políticos e ao gerenciamento dos investimentos na educação, incluindo políticas de formação de professores.

É impossível imaginar um cenário de mudanças no sistema educacional sem considerar o papel dos professores. A partir dos debates acerca de um ensino de ciências transformador, a atenção tem sido direcionada para as políticas de formação dos professores de ciências, pois as competências e habilidades necessárias a um ensino significativo na educação básica, por exemplo, são consideravelmente desenvolvidas no processo de formação inicial.

No entanto, pensar na formação do professor também significou debater mais amplamente sobre as questões de ensino de química no Brasil, o que ocorreu a partir de 1980, quando Áttico Chassot organizou o primeiro Encontro de Debates em Ensino de Química (EDEQ). Vale ressaltar que o ensino de química começou a ser discutido por especialistas brasileiros, ainda que minimamente, na primeira Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (SBQ), em 1978 (Schnetzler, 2002).

Nesse mesmo período, o ensino e a aprendizagem de ciências passaram a ser estudados e conduzidos segundo abordagens construtivistas:

As teorias de Bruner e o construtivismo interacionista de Piaget valorizavam a aprendizagem pela descoberta; o desenvolvimento de habilidades cognitivas; sugeriam que os estudantes deveriam lidar diretamente com materiais e realizar experiências para aprender de modo significativo e que o professor não deveria ser um transmissor de informações, mas orientador do ensino e da aprendizagem. (Nascimento; Fernandes; Mendonça, 2010, p. 228)

Tais abordagens surgiram em oposição aos modelos comportamentalistas, de modo que a ênfase no resultado escolar foi deslocada para o processo, em uma tentativa de tornar o aprendiz protagonista da construção dos conhecimentos, admitindo-se, enquanto parte da aprendizagem, os erros decorrentes desse processo.

Extrai-se da discussão em Schnetzler (2002), que o ensino de química enquanto campo de pesquisa vem se desenvolvendo em resposta ao predomínio de ações educativas tradicionais, as quais têm valorizado modelos de transmissão de conhecimentos incompatíveis com as necessidades da sociedade moderna. Assim, o desvio do papel social da ciência tem causado sérios prejuízos, considerando que, “no Brasil, a preocupação com essa atribuição do sistema educacional e do ensino de Ciências apenas aflora no nível dos documentos oficiais, estando ainda muito longe dos cursos de formação de professores e mais ainda das salas de aula” (Krasilchik, 1992, p. 5). Infelizmente, ainda que as discussões em nível de pós-graduação tenham aumentado, pode-se dizer que a situação descrita por Krasilchik é atual.

A partir da década de 1980, os programas curriculares foram muito influenciados por teorias construtivistas como a de Piaget, o qual difundiu a importância de se considerar o desenvolvimento cognitivo na compreensão do comportamento humano e do conhecimento que temos do mundo. As noções de equilíbrio, maturação, experiência e transmissão social enquanto fatores cruciais para o desenvolvimento cognitivo vêm sendo aplicadas em diferentes contextos educacionais, porém, causando certa preocupação, em se tratando do ensino de ciências. Sequeira (1990) apontou algumas limitações da teoria de Piaget no âmbito do ensino de ciências, principalmente por não tratar das diferenças individuais do aprendiz e da estrutura das disciplinas de ciências.

A questão levantada por Sequeira (1990) retrata a necessidade observada por pesquisadores do ensino de ciências quanto à investigação das especificidades dos saberes científicos e conhecimentos prévios dos estudantes. Na onda de mudanças curriculares e de olhares para o ensino de ciências,

os pesquisadores passaram a se fundamentar em contribuições da psicologia cognitivista, concebendo a aprendizagem como evolução, reorganização ou mudança das concepções dos alunos, cabendo ao ensino a sua promoção. Nessa linha, cerca de 4000 pesquisas foram realizadas nos anos 80 (movimento das concepções alternativas), muitas das quais evidenciaram que concepções “errôneas” sobre inúmeros conceitos científicos eram detectadas mesmo após os alunos terem freqüentado e sido aprovados em cursos de Ciências. (Schnetzler, 2002, p. 15)

Desde então, o estudo das concepções dos estudantes passou a ser um caminho para a identificação das dificuldades de aprendizagem relativas à compreensão dos saberes químicos. O problema posto é que mesmo após as instruções, os estudantes podem permanecer com uma concepção errônea. Isso porque eles geralmente possuem uma concepção prévia acerca de um assunto, mas podem resistir às mudanças de concepção, uma vez que os “estudantes usam seu conhecimento existente (ex. sua ecologia conceitual), para determinar se as diferentes

condições se encontram, ou seja, se uma nova concepção é inteligível (sabe o que significa), plausível (acredita que é verdade), e frutífera (considera útil)” (Hewson, 1992, p. 8, tradução minha). Por exemplo, sabe-se da experiência do cotidiano que um copo com água fria faz surgir gotículas de água na parede exterior do copo. Com frequência, pode-se ouvir de estudantes que o copo está suando (concepção prévia/alternativa), mas ao aprender que o ar atmosférico contém água em forma gasosa e que ela condensa em contato com a parede fria do copo, esses estudantes vão aos poucos internalizando a nova concepção. No primeiro momento, pode acontecer um choque, uma espécie de conflito cognitivo, uma vez que a opinião primeira (Bachelard, 1996) é resistente às mudanças conceituais. Enquanto para Posner *et al.* (1982), no contexto da escolarização formal, os estudantes deveriam romper com suas concepções prévias, Mortimer, Scott e El-Hani (2011) pontuam que uma nova concepção não necessariamente substitui uma concepção anterior. Ou seja, é possível conviver com diferentes modos de pensar e falar, dentro e fora da sala de aula.

O estudo das concepções alternativas não só abriu espaço para a compreensão da natureza dos conhecimentos químicos em si e das dificuldades de aprendizagem associadas, mas também da natureza psicológica, no que diz respeito aos recursos cognitivos mobilizados no estudo desses conhecimentos. Um exemplo marcante é a dificuldade de aprendizagem em química a partir das representações, sejam bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Assim, o campo de pesquisa sobre representações químicas é vasto e tem oferecido contribuições significativas, ressaltando a necessidade de desenvolver habilidades representacionais para uma compreensão eficaz de fenômenos químicos (Huang; Liu, 2012; Martina, 2017).

Nesse contexto, abre-se uma discussão importante acerca das tecnologias digitais na educação. O estudo das concepções alternativas e das representações químicas revela os desafios intrínsecos ao ensino de química e abre um leque de possibilidades: a adoção de tecnologias digitais como meios para superar essas barreiras.

As tecnologias digitais, particularmente a realidade aumentada (Coduto, Lazicki; Leddy, 2024; Silva; Correia, 2023b; Wong; TSang; Chiu, 2021) e a realidade virtual (Fombona-Pascual; Fombona; Vázquez-Cano, 2022), apresentam-se como ferramentas potentes nesse contexto. Elas oferecem a possibilidade de transcender as limitações das representações 2D, oferecendo aos estudantes experiências imersivas em ambientes tridimensionais. Isso leva a uma compreensão mais intuitiva das estruturas moleculares e propicia o desenvolvimento de habilidades espaciais.

Embora as investigações desta pesquisa de doutorado tenham contemplado múltiplas lentes teóricas, a noção de aprendizagem escolar que orienta as abordagens empregadas leva em consideração que:

Aprendizagem é uma mudança no conhecimento do aluno que é atribuível à experiência. A aprendizagem depende do processamento cognitivo do aluno durante a aprendizagem e inclui: (a) seleção – atenção ao material relevante que chega; (b) organização – organizar o material recebido em uma representação mental coerente; e (c) integração – relacionando o material recebido com o conhecimento existente na memória de longo prazo. (Mayer, 2008, p. 761, tradução minha)

Considerando-se que o trabalho com recursos tecnológicos é influenciado pelo método instrucional e variáveis tecnológicas e psicológicas envolvidas, adotou-se a seguinte ideia de processamento da informação descritos em Mayer (2008):

Os elementos mais relevantes numa ciência da aprendizagem são (a) canais duplos – a ideia de que os humanos possuem canais separados para processar material visual e verbal; (b) capacidade limitada – a ideia de que cada canal pode processar apenas uma pequena quantidade de material de cada vez; e (c) processamento ativo – a ideia de que a aprendizagem profunda depende do processamento cognitivo do aluno durante a aprendizagem (por exemplo, seleção, organização e integração). (Mayer, 2008, p. 761, tradução minha)

Dessa forma, em geral, os recursos didáticos utilizados nos estudos apresentados foram organizados em compatibilidade com um design instrucional orientado pela noção de aprendizagem trazida por Mayer (2008).

## **2 EXPLORANDO POSSIBILIDADES DE INVESTIGAÇÕES E PRÁTICAS RELACIONADAS À APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR**

Esta seção explora as possibilidades de investigação sobre a aprendizagem de geometria molecular na Educação Básica (Ensino Médio) e Educação Superior (graduação). Iniciou-se com uma revisão sistemática da literatura, destacando-se o que vem sendo estudado e identificando lacunas que oferecem oportunidades de pesquisa.

Seguiu-se com a realização de entrevistas com docentes, visando conhecer suas percepções acerca da aprendizagem de geometria molecular. Esta etapa foi inspirada pelas considerações da revisão sistemática, que apontaram uma lacuna no que se refere ao conhecimento dos professores sobre como os estudantes aprendem geometria molecular.

Por fim, prosseguiu-se com uma investigação teórica que justificou o uso de mapas conceituais como ferramentas de organização gráfica do conhecimento, considerando seu potencial na educação em ciências. Essa pesquisa foi essencial para orientar a elaboração dos materiais instrucionais utilizados nas intervenções didáticas dos estudos II e III.

### **2.1 ENSINO E APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA<sup>2</sup>**

O objetivo desta pesquisa foi identificar e analisar estudos teóricos e empíricos acerca da aprendizagem de geometria molecular, identificando evidências científicas e possíveis lacunas para direcionar futuras pesquisas. Conduziu-se uma pesquisa bibliográfica, a partir de uma revisão sistemática da literatura, analisando-se 46 estudos teóricos e empíricos extraídos de diretórios de busca nacionais e internacionais. Quatro linhas de investigação principais foram identificadas – habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, diagnóstico de erros conceituais, estratégias didáticas – para caracterizar as discussões atuais em torno do tema.

As lacunas existentes se relacionam com limitações na abordagem quanto à: (1) relação da questão da visualização em química com o desenvolvimento de habilidades espaciais; (2) identificação de erros conceituais relacionados não só a conceitos de geometria molecular, mas à questão da espacialidade; (3) perspectiva de professores de química acerca do ensino e aprendizagem de geometria molecular. As lacunas apontadas oferecem ideias aos leitores para

---

<sup>2</sup> O conteúdo desta seção secundária está sendo avaliado pela Revista Debates em Ensino de Química (REDEQUIM).

que novas pesquisas sejam conduzidas visando uma melhor compreensão de diferentes aspectos da aprendizagem de geometria molecular.

### 2.1.1 Introdução

O estudo da geometria molecular é importante para a compreensão submicroscópica das propriedades físicas e químicas dos compostos (Baldock *et al.*, 2021). Porém, as dificuldades de aprendizagem têm se apresentado de diferentes maneiras. A natureza abstrata e densamente conceitual desse conteúdo pode provocar problemas de compreensão e distanciar os estudantes dos objetivos visados pelo ensino (Silva, 2018). Para minimizar as dificuldades, pesquisadores têm se debruçado sobre questões de ordem epistemológica, didática e psicológica atreladas ao ensino e aprendizagem de química (Astolfi; Develay, 1990). Assim, concordamos com Joshua e Dupin (1993) quando mencionam que o ensino de ciências não deve se basear em uma Pedagogia Geral, por meio da qual são escolhidas estratégias de aprendizagem que não levam em consideração o conteúdo visado pelo ensino. Considerar as características dos saberes específicos de química é essencial para a estruturação de práticas educativas.

Do ponto de vista epistemológico, Silva, Fonseca e Freitas (2018) verificaram que o processo evolutivo da noção de geometria molecular envolveu grandes obstáculos, incluindo a superação da limitação para a representação tridimensional de estruturas moleculares. Os autores mostraram “que a questão da visualização em química e da necessidade de manipulação física de modelos moleculares é constitutiva da própria evolução histórica da geometria molecular” (Silva; Fonseca; Freitas, 2018, p. 646). Em termos didáticos, nos últimos anos, a preocupação com estratégias de ensino alternativas para o ensino de química tem incentivado pesquisas empíricas que lidam com o saber “estrutura molecular”, abordando, principalmente, tópicos de geometria molecular devido à sua natureza visuoespacial e importância para a compreensão de fenômenos químicos (Silva; Fonseca, 2021). Quanto às questões psicológicas, têm-se evidenciado que a falta de competências representacionais (habilidade espacial) para lidar com a visualização em química é, também, um fator desfavorável à compreensão do assunto (Donaghy; Saxton, 2018). Além disso, a produção de erros conceituais tem dificultado o entendimento de conceitos científicos como ligação química e repulsão eletrônica (Karonen *et al.*, 2021).

Os erros conceituais podem ser compreendidos como ideias não condizentes em termos científicos e que se apresentam como obstáculos de aprendizagem (Silva; Correia, 2023a). Para

além de erros conceituais associados à estrutura molecular, Silva e Correia (2023a) evidenciaram que há erros conceituais importantes quanto às múltiplas representações. Dos cinco erros conceituais apresentados, o mais frequente mostrou que “na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, a conformação dos átomos passa despercebida, valorizando-se a presença de átomos e tipos de ligações químicas” (Silva; Correia, 2023a). A identificação dos erros é, portanto, essencial para orientar a prática educativa, permitindo o reconhecimento de padrões recorrentes de equívocos e a implementação de estratégias para prevenir sua perpetuação.

Dessa forma, tendo em vista as questões epistemológicas, didáticas e psicológicas associadas à aprendizagem de geometria molecular, torna-se imprescindível compreender as concepções dos estudantes e as práticas educativas habituais. Uma forma de alcançar essa compreensão é explorar na literatura da área em busca de respostas para as seguintes perguntas: Quais são as dificuldades dos estudantes quanto à aprendizagem de geometria molecular? Quais são as características dos métodos de ensino empregados? Portanto, o objetivo foi caracterizar estudos teóricos e empíricos acerca da aprendizagem de geometria molecular, identificando evidências científicas e possíveis lacunas para direcionar futuras pesquisas. Os resultados foram obtidos pela realização de uma revisão sistemática da literatura.

A necessidade de uma revisão dessa natureza surge em resposta à preocupação com a operacionalização da atual BNCC para o ensino de ciências da natureza, sinalizando a importância das pesquisas educacionais acerca de saberes químicos, principalmente os que não estão explicitados no documento. A redução de conteúdos de química em favor de um trabalho interdisciplinar, crítico e reflexivo (Alves *et al.*, 2021) tem causado dúvidas quanto à qualidade do ensino. Os educadores deverão ficar atentos para reconhecer, em temas gerais, a necessidade de abordagem do conhecimento específico “geometria molecular”, uma vez que ele não é explicitado na BNCC. Dessa forma, esta RSL promove uma reflexão acerca dos cuidados e diferentes contextos em que os conceitos químicos abordados podem ser empregados, além de revelar características do ensino habitual e perspectivas de pesquisa.

### **2.1.2 Metodologia**

Desenvolveu-se uma pesquisa bibliográfica, a partir de uma RSL, com o intuito de identificar evidências científicas acerca da aprendizagem de geometria molecular e possíveis lacunas para direcionar futuras pesquisas. Segundo Kitchenham (2004, p. 1, tradução nossa),

“uma revisão sistemática da literatura é um meio de identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis relevantes para uma determinada questão de pesquisa, área ou fenômeno de interesse”. A RSL considerou a metodologia apresentada por Kitchenham (2004), que consiste em identificar a necessidade de revisão, desenvolver um protocolo de revisão, identificar a pesquisa, selecionar estudos primários, avaliar a qualidade dos estudos, extrair os dados de interesse, sintetizar os dados e reportar a revisão.

A necessidade de revisão acerca da aprendizagem de geometria molecular surgiu da identificação de uma crescente investigação e utilização de estratégias didáticas com materiais alternativos e tecnologias digitais. No âmbito nacional, verificou-se que os programas brasileiros de pós-graduação em ensino de ciências têm sido a principal fonte de pesquisas nessa área, motivo pelo qual decidiu-se incluir o Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES enquanto diretório de busca, tendo em vista a escassez de artigos – sobre o tema – publicados em periódicos.

As bases de dados *Web of Science Core Collection* e Periódicos CAPES também foram utilizadas para representar artigos – avaliados por pares e às cegas – internacionais e nacionais, respectivamente. Dessa forma, com a RSL foi possível obter um panorama das tendências de pesquisa, conclusões gerais e lacunas acerca da aprendizagem de geometria molecular.

Previamente à revisão, um protocolo foi elaborado pelos autores com todas as técnicas e métodos – aqui apresentados – relacionados às questões de pesquisa, fontes, qualidade, extração e síntese dos estudos primários.

Para selecionar estudos primários, buscou-se artigos científicos, dissertações e teses publicadas sem delimitação temporal, com ano limite 2022 (data da própria pesquisa). A busca principal de artigos foi realizada na base de dados *Web of Science Core Collection*, utilizando-se a *string* ("*molecular structure\**" or "*molecular geometry*" or "*molecular shape\**" or "*shape of molecule\**") and ("*misconception\**" or "*conception\**" or "*perception\**" or "*conceptual error\**" or "*alternative concept\**") and ("*student\**") para busca em títulos e resumos de artigos, resultando em 60 artigos, dos quais foram selecionados 21 para análise. Considerou-se artigos em inglês, espanhol e português. Em inglês, conteúdos de geometria molecular podem aparecer com outros termos, por isso a necessidade de incluir mais termos de busca. Além disso, considerando-se que no cenário brasileiro há poucas pesquisas acerca de erros conceituais de geometria molecular, adicionou-se termos mais específicos para trazer contribuições internacionais.

Adicionalmente, realizou-se uma busca no Catálogo de Dissertações e Teses da CAPES, sem delimitação temporal, com a *string* "geometria molecular", resultando em 89 obras, das quais foram selecionadas 18 dissertações e 1 tese para análise. Também foi realizada uma busca de artigos nacionais na base de dados Periódicos CAPES, sem delimitação temporal, com a *string* "geometria molecular" *and* "aprendizagem", resultando em 12 artigos, dos quais foram selecionados 6 para análise. O total de obras consultadas foi de 46. Para a busca de pesquisas nacionais, utilizou-se um termo mais abrangente para retornar o máximo de trabalhos possível.

Enquanto critérios de inclusão para evitar o viés (*bias*) dos autores, os estudos teóricos ou empíricos selecionados apresentaram pelo menos uma das seguintes características: abordar geometria molecular em seus aspectos conceituais ou tridimensionais; citar conceitos de geometria molecular, mesmo quando o tema principal for estrutura atômica, ligação química intramolecular ou intermolecular, polaridade; incluir noções de repulsão eletrônica em assuntos de estrutura molecular; incluir questões visuais e/ou espaciais que remetem à geometria molecular. Foram excluídos os estudos que não abordavam a aprendizagem de geometria molecular em algum dos aspectos supracitados ou que não tinham relação com a área de Ensino.

Os estudos foram analisados às cegas pelos autores, iniciando-se pela leitura do título, resumo e introdução. A qualidade dos estudos foi avaliada por meio da leitura integral das pesquisas, buscando-se respostas para as perguntas de pesquisa.

Os dados de interesse extraídos foram analisados para apresentar, inicialmente, informações gerais e propiciar a categorização dos estudos em quatro perspectivas: habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, diagnóstico de erros conceituais, estratégias didáticas. O processo de categorização considerou as ênfases em objetivos e abordagens teóricas trazidas pelos estudos. Em habilidades espaciais constam trabalhos que discutem a visualização em química, não necessariamente enfocando no desempenho dos estudantes em termos conceituais. Trabalhos que enfatizam a importância da estrutura molecular para a compreensão dos processos químicos e físicos foram classificados em relação estrutura-propriedade. Já os trabalhos de diagnóstico de erros conceituais estão associados à busca de equívocos internalizados pelos estudantes ao longo do processo de aprendizagem. Por fim, os estudos categorizados em estratégias didáticas trazem como foco a análise da construção e implementação de ferramentas alternativas e/ou digitais em contextos de sala de aula.

Apresenta-se informações sobre os artigos internacionais, seguidos dos estudos nacionais (dissertações, tese e artigos), prosseguindo-se com uma análise aprofundada de todas

as obras. O tópico conclusões e implicações traz as lacunas encontradas, a diferença dos contextos nacionais e internacionais, tendências e recomendações de pesquisas futuras.

### 2.1.3 Apresentação da literatura internacional e do mecanismo de categorização dos estudos

A pesquisa de artigos na *Web of Science* resultou em 60 artigos, que tiveram seus resumos lidos para serem selecionados. Priorizou-se 21 artigos com relação mais estreita com a questão da geometria molecular (Quadro 1). O volume maior de artigos que não foram selecionados se justifica em decorrência da presença do termo “*molecular structure*” na *string* de busca, que ampliou as possibilidades de resultados mais ligados às noções de ligações químicas. Percebeu-se que pesquisas sobre ligações químicas, forças intermoleculares e polaridade são mais intensas do que unicamente sobre geometria molecular. Todavia, considerando que as dificuldades de aprendizagem de geometria molecular estão comumente associadas às investigações sobre ligações químicas, optou-se por verificar no resumo de cada artigo se o conteúdo levava às questões de geometria molecular.

Quadro 1 – Lista dos artigos internacionais consultados ( $n=21$ ) a partir de dados da *Web of Science* (2022)

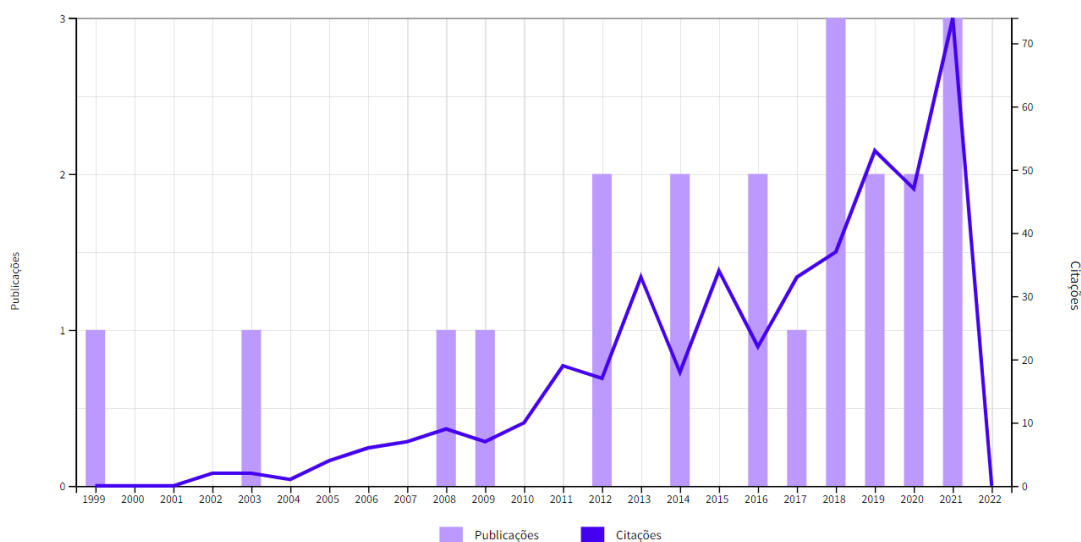
Título do artigo	Autor (ano)
Student discovery of the relationship between molecular structure, solubility, and intermolecular forces	Baldock <i>et al.</i> (2021)
Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: the Lewis structure as an example	Karonen <i>et al.</i> (2021)
Orbitals in general chemistry, part I: the great debate	Lamoureux e Ogilvie (2019a)
Hybrid atomic orbitals in organic chemistry. Part 2: critique of practical aspects	Lamoureux e Ogilvie (2019b)
Student perceptions using augmented reality and 3D visualization technologies in chemistry education	Abdinejad <i>et al.</i> (2021)
Designing three-dimensional models that can be printed on demand and used with students to facilitate teaching molecular structure, symmetry, and related topics	Savchenkov (2020)
The impact of core-idea centered instruction on high school students' understanding of structure-property relationships	Stowe <i>et al.</i> (2019)
Molecular visualization on the holodeck	Goddard <i>et al.</i> (2018)
Visualizing molecular structures and shapes: a comparison of virtual reality, computer simulation, and traditional modeling	Brown <i>et al.</i> (2020)
Prediction! The VSEPR game: using cards and molecular model building to actively enhance students' understanding of molecular geometry	Cane e Williams (2018)
An inquiry experience, with high school students to develop an understanding of intermolecular forces by relating boiling point trends and molecular structure	Ogden (2017)
Connecting protein structure to intermolecular interactions: a computer modeling laboratory	Abualia <i>et al.</i> (2016)

An epistemological inquiry into organic chemistry education: exploration of undergraduate students' conceptual understanding of functional groups	Akkuzu e Uyulgan (2016)
Rabbit-ears hybrids, VSEPR sterics, and other orbital anachronisms	Clauss <i>et al.</i> (2014)
Assessing the students' understanding related to molecular geometry using a two-tier diagnostic test	Uyulgan <i>et al.</i> (2014)
Connecting geometry and chemistry: a three-step approach to three-dimensional thinking	Donaghy e Saxton (2012)
Development and validation of the implicit information from Lewis structures instrument (IILSI): do students connect structures with properties?	Cooper <i>et al.</i> (2012)
The effects of conceptual change texts accompanied with animations on overcoming 11th grade students' alternative conceptions of chemical bonding	Ozmen <i>et al.</i> (2008)
SimChemistry as an active learning tool in chemical education	Bolton <i>et al.</i> (2008)
Students' understanding of molecular structure representations	Ferk <i>et al.</i> (2003)
Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding	Birk e Kurtz (1999)

Fonte: Os autores.

Dos 21 artigos internacionais selecionados, 17 foram publicados nos últimos 10 anos (Figura 1). Verificou-se que a quantidade de citações acompanhou a evolução de publicações sobre o tema. Além disso, a maioria dos artigos (74%) foi publicada em periódicos especializados em educação científica.

Figura 1 – Número de citações e publicações ao longo do tempo



Fonte: *Web of Science* (2022).

Para ilustrar o mecanismo de classificação dos estudos em quatro categorias, apresenta-se os cinco artigos mais citados que destacam abordagens diferenciadas, mas complementares, no sentido de buscar a compreensão de aspectos epistemológicos, didáticos e psicológicos da geometria molecular. Entenda-se por aspecto psicológico a operacionalização de funções

cognitivas não diretamente associadas à aprendizagem de conceitos, mas a mecanismos – visuoespaciais, por exemplo – que integram o sistema de compreensão. Embora nem todos os títulos indiquem o estudo de geometria molecular, verifica-se que todos tratam de algum aspecto da estrutura molecular, remetendo ao estudo da organização espacial das moléculas.

O artigo mais citado (Ferk *et al.*, 2003) possui 90 citações e retrata a questão psicológica por trás das habilidades espaciais, necessárias para o desenvolvimento do letramento visual e, conseqüentemente, operação mental de representações visuais. Os autores evidenciaram que a utilização de representações mais concretas como modelos moleculares tridimensionais e figuras de moléculas em 3D favorece a percepção e apreciação de modelos em química.

Cooper *et al.* (2012) – 65 citações – discorrem acerca da dificuldade dos estudantes em estabelecer relações entre a estrutura e propriedades das representações químicas. Com frequência, os estudantes falham quando precisam atribuir significado ou funcionalidade para determinadas simbologias e/ou representações. Por exemplo, ao observar a fórmula molecular da água, o estudante também deveria ser capaz de transitar entre suas diferentes representações (estrutura de Lewis, modelo com nuvens eletrônicas, bolas e varetas, carga parcial) com o objetivo de explicar o comportamento químico e físico da água, em decorrência da sua polaridade.

O artigo publicado por Birk e Kurtz (1999) – 61 citações – traz a validação de um teste diagnóstico cujo objetivo é mapear os erros conceituais dos estudantes quanto às noções de ligações químicas e estrutura molecular. Dessa forma, a pesquisa conduzida pelos autores contribui para o ensino de química, uma vez que disponibiliza um teste diagnóstico validado e elucida os erros conceituais mais importantes acerca da geometria molecular, polaridade das ligações e das moléculas.

Já o artigo com 46 citações (Ozmen *et al.*, 2008) apresenta uma proposta didática baseada em erros conceituais de cinco tópicos: geometria molecular, polaridade da ligação, forças intermoleculares, polaridade das moléculas e ligações químicas. De acordo com os autores, estratégias didáticas com tecnologias (animações) favoreceu a mudança conceitual dos participantes.

Goddard *et al.* (2018) – 39 citações – apresentam uma proposta didática que envolve o uso de representações moleculares por meio da tecnologia de realidade virtual. Com isso, os autores argumentam que a percepção de relações espaciais é aprimorada com a utilização de realidade virtual, em comparação com telas convencionais.

A análise dos objetivos e abordagens teórico-metodológicas feita nos cinco artigos internacionais mais citados revelou os elementos necessários para a categorização de todas as obras em quatro perspectivas: habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, diagnóstico de erros conceituais, estratégias didáticas.

#### 2.1.4 Apresentação da literatura nacional (catálogo de dissertações e teses; periódicos CAPES)

A pesquisa de obras no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES resultou em 89 trabalhos, que tiveram seus títulos e resumos lidos para serem selecionados. Priorizou-se 19 trabalhos associados ao ensino de geometria molecular, sendo 18 dissertações e uma tese (Quadro 2). O volume maior de estudos que não foram selecionados se justifica em decorrência da presença do termo “geometria molecular” na *string* de busca, que ampliou as possibilidades de resultados com pesquisas de áreas interdisciplinares e multidisciplinares, mas não pertinentes para o presente estudo.

Quadro 2 – Lista das 18 dissertações e uma tese consultadas no catálogo de dissertações e teses CAPES

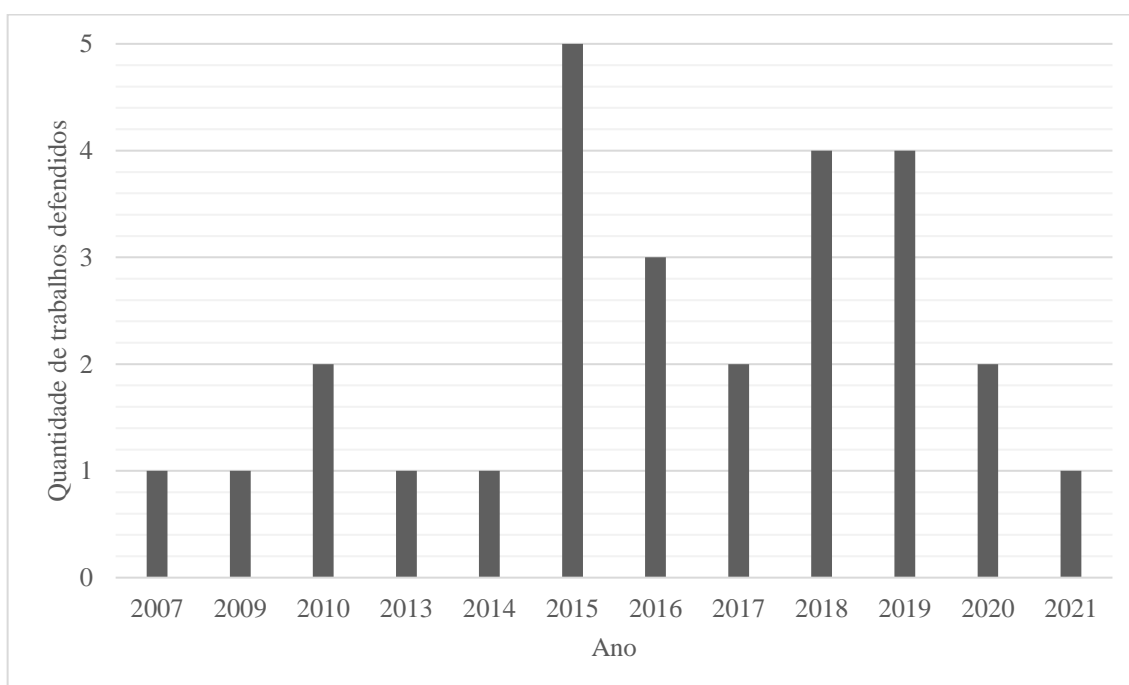
Título	Autor (ano)
Tecnologias no ensino de geometria molecular	Neto (2007)
Modelos confeccionados em impressora 3d para o ensino de geometria molecular em química	Andrade (2019)
Ensino de geometria molecular com aplicativo de simulação digital: possíveis contribuições para uma aprendizagem significativa	Santos (2019)
Geometria Molecular: Elaboração, Aplicação e Avaliação de uma Sequência Didática Envolvendo o Lúdico	Silva (2016)
Desenvolvimento de aplicativos educacionais para química: ferramentas para o aprendizado de configuração eletrônica e geometria molecular [Tese]	Araujo (2019)
Avaliação didática dos materiais alternativos no conteúdo de geometria molecular: uma proposta para o ensino de química	Martins (2017)
Aprendendo a imaginar moléculas: uma proposta de ensino de geometria molecular	Sebata (2006)
Origami arquitetônico como recurso pedagógico para a compreensão da geometria espacial de moléculas	Maia (2019)
Software educativo: um instrumento para explorar conceitos nas representações simbólicas no ensino da geometria molecular	Carvalho (2009)
A Realidade Virtual Como uma ferramenta para o ensino da geometria molecular	Moura (2010)
O jogo e a teoria do processamento da informação no ensino de geometria molecular	Silva (2020)
Utilização e avaliação de software para geometria molecular no ensino médio	Manfio (2019)
Recursos didáticos para o ensino de geometria molecular á alunos cegos em classes inclusivas	Barros (2018)
Metodologias didáticas alternativas para o ensino de geometria molecular e soluções: estratégias para a construção do conhecimento	Bouzon (2015)
A neurociência cognitiva como base da aprendizagem de geometria molecular: um estudo sobre atributos do funcionamento cerebral relacionados à memória de longo prazo	Silva (2018)

Ensino de geometria molecular, para alunos com e sem deficiência visual, por meio de modelo atômico alternativo	Bertalli (2010)
Sismol3d: desenvolvimento de um software educacional para o ensino de estruturas moleculares em química	Silva (2014)
Estrutura química para o 9º ano do Ensino Fundamental: uma proposta de ensino envolvendo tecnologia digital com vista à aprendizagem significativa	Bacega (2020)
Estudo da motivação do estudante trabalhando com modelos moleculares concretos, validada por meio de vídeo e áudio	Fabri (2016)

Fonte: Os autores.

Verifica-se que nos últimos sete anos a frequência de defesas de trabalhos foi mais expressiva (Figura 2). Em geral, as pesquisas lidam com estratégias didáticas para a aprendizagem de geometria molecular. Nota-se que 51,8% dos programas de pós-graduação são da área de avaliação da CAPES Ensino, enquanto 29,6% são da área de Química. O caráter multidisciplinar do objeto de estudo relacionado ao Ensino de Química possibilitou a defesa de cinco pesquisas em diferentes áreas de avaliação (Engenharia e Ciências dos Materiais, Engenharia Elétrica, Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, Ciências Naturais, Matemática). Vale reportar que 48% dos trabalhos foram defendidos no âmbito do mestrado profissional, mostrando que a questão do ensino de geometria molecular vem sendo abordada em termos práticos, como a elaboração, aplicação e avaliação de estratégias didáticas.

Figura 2 – Quantidade de trabalhos defendidos por ano (catálogo de dissertações e teses CAPES)



Fonte: Os autores.

Os artigos nacionais foram encontrados por meio de busca no portal Periódicos CAPES, com a *string* "geometria molecular" and "aprendizagem". Dos 12 artigos encontrados, seis foram selecionados (Quadro 3).

Quadro 3 – Lista de artigos nacionais (n=6) consultados pelo Periódicos CAPES

Título do artigo	Autor (ano)
A realidade aumentada como recurso auxiliar para a aprendizagem significativa de geometria molecular	Rocha <i>et al.</i> (2021)
Neurociência e educação: estratégias multissensoriais para a aprendizagem de geometria molecular	Silva e Fonseca (2021)
Geomequímica: um jogo baseado na Teoria Computacional da Mente para a aprendizagem de conceitos de geometria molecular	Silva e Soares (2021)
Elaboração de holograma para o ensino de geometria molecular	Lima e Almeida (2020)
A utilização de materiais alternativos no Ensino de Química no conteúdo de geometria molecular	Martins <i>et al.</i> (2018)
Geometria molecular acessível para alunos com deficiência visual	Ribeiro <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Os autores.

Com exceção da pesquisa de Silva (2018), todos os trabalhos nacionais foram classificados na categoria “estratégias didáticas”, por enfatizar a geometria molecular em termos de elaboração e aplicação de recursos tecnológicos e/ou físicos para uma aprendizagem mais efetiva. Verifica-se que os artigos foram publicados nos últimos cinco anos, revelando que conhecimentos mais voltados à visualização espacial figuram como emergentes para a aprendizagem de química.

### 2.1.5 Análise de todas as obras consultadas por categoria

A análise dos estudos internacionais e nacionais permitiu classificá-los em quatro perspectivas: habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, diagnóstico de erros conceituais, estratégias didáticas. Diante da possibilidade de uma obra explorar mais de uma categoria, o Quadro 4 mostra a frequência com que as categorias aparecem.

Quadro 4 – Classificação das obras por enfoque teórico-metodológico

Categoria	Autor (ano)	Quantidade (Frequência)
Habilidades espaciais	Savchenkov (2020); Goddard <i>et al.</i> (2018); Brown <i>et al.</i> (2020); Donaghy e Saxton (2012); Ferk <i>et al.</i> (2003); Silva (2018)	6
Relação estrutura-propriedade	Baldock <i>et al.</i> (2021); Stowe <i>et al.</i> (2019); Cooper <i>et al.</i> (2012)	3
Diagnóstico de erros conceituais	Karonen <i>et al.</i> (2021); Stowe <i>et al.</i> (2019); Akkuzu e Uyulgan (2016); Uyulgan <i>et al.</i> (2014); Özmen <i>et al.</i> (2008); Birk e Kurtz (1999); Lamoureux e Ogilviea (2019a); Lamoureux e Ogilviea (2019b); Clauss <i>et al.</i> (2014)	9

Estratégias didáticas	Baldock <i>et al.</i> (2021); Abdinejad <i>et al.</i> (2021); Savchenkov (2020); Cane e Williams (2018); Ogden (2017); Abualia <i>et al.</i> (2016); Donaghy e Saxton (2012); Özmen <i>et al.</i> (2008); Bolton <i>et al.</i> (2008); Rocha <i>et al.</i> (2021); Silva e Fonseca (2021); Silva e Soares (2021); Lima, Almeida (2020); Martins <i>et al.</i> (2018); Ribeiro <i>et al.</i> (2018); Neto (2007); Andrade (2019); Santos (2019); Silva (2016); Araújo (2019); Martins (2017); Sebata (2006); Maia (2019); Carvalho (2009); Moura (2010); Silva (2020); Manfio (2019); Barros (2018); Bouzon (2015); Silva (2018); Bertalli (2010); Silva (2014); Bacega (2020); Fabri (2016).	34
-----------------------	--	----

Fonte: Os autores.

Na sequência são apresentados todos os estudos por categoria. Nas duas primeiras categorias – habilidades espaciais e relação estrutura-propriedade – buscou-se destacar as abordagens conceituais que sustentam as discussões e proposições apresentadas pelos autores. Em diagnóstico de erros conceituais procurou-se identificar os equívocos de aprendizagem ligados à geometria molecular. Já em estratégias didáticas, buscou-se responder às questões: “Em quais pressupostos teóricos as pesquisas se fundamentam?”, “Quais metodologias de ensino foram empregadas?”.

#### 2.1.5.1 Habilidades espaciais

Embora as motivações para a realização de pesquisas acerca da aprendizagem de estrutura molecular se originem da questão da visualização em química, poucas pesquisas têm explorado esse aspecto no âmbito do desenvolvimento de habilidades espaciais ou funções cognitivas associadas à visualização.

Savchenkov (2020), por exemplo, desenvolveu e imprimiu moléculas em impressoras 3D para facilitar o ensino e aprendizagem de estrutura molecular a partir de modelos físicos. Ainda que o uso de tecnologias digitais seja almejado, defende-se também o uso de modelos físicos, uma vez que há estudantes cuja orientação sensorial dominante na aprendizagem é cinestésica e háptica. O fundamento do trabalho de Savchenkov (2020) em noções da psicologia chama a atenção, quando traz aspectos cognitivos como a percepção tátil enquanto estratégia a ser estimulada na aprendizagem de química.

A questão da percepção espacial é também abordada por Goddard *et al.* (2018), mas, dessa vez, a partir da tecnologia de realidade virtual, que consiste em promover uma imersão virtual em cenários e objetos tridimensionais que simulam a realidade. Os autores defendem o uso da realidade virtual para uma melhor percepção e avaliação de características de estruturas moleculares. Além disso, sugerem que a percepção de relações espaciais e suas variações no

tempo pode ser aprimorada com o uso de realidade virtual, em comparação com as telas convencionais. Brown *et al.* (2020) também “saem” em defesa da tecnologia de realidade virtual no ensino de química porque propicia uma aprendizagem centrada no estudante, com um viés construtivista. Os autores evidenciaram que o uso da realidade virtual trouxe mais motivação e engajamento dos estudantes.

Donaghy e Saxton (2018) desenvolveram uma técnica de construção de moléculas físicas a partir de bolas e varetas, utilizando-se um modelo/esqueleto tetraédrico para auxiliar no posicionamento dos átomos para se obter ângulos mais precisos. Donaghy e Saxton (2018) sugerem que a manipulação dos dispositivos pode aumentar a capacidade espacial dos estudantes, favorecendo o que chamaram de pensamento tridimensional.

Para Ferk *et al.* (2003), a literacia visual tem despertado o interesse de educadores devido à procura frequente por tecnologias digitais para o ensino. Os referidos autores concordam com Barnea (2000) quando elencam os três níveis de dificuldade associados às habilidades visuais. O primeiro nível de dificuldade se refere à “visualização espacial”, que é a habilidade de entender representações em 3D a partir de suas representações 2D. Em seguida, a “orientação espacial” é quando se imagina uma representação a partir de diferentes perspectivas. Por fim, o último nível “relações espaciais” está relacionado com a habilidade de manipular objetos mentalmente, visualizando efeitos de operações mentais como rotação, reflexão e inversão. Ferk *et al.* (2003) aplicaram um teste de visualização de moléculas e evidenciaram que a apreciação de moléculas varia com o tipo de representação. Assim, o uso de modelos concretos e figuras estáticas – fotografias e modelos de computador 3D – favorecem a visualização de aspectos tridimensionais.

Silva (2018) se baseia na noção de múltiplas representações apresentada por Martina (2017) para sugerir a utilização de mais de um meio representacional para trabalhar conceitos de química. O trabalho com múltiplas representações pode levar à fluência conexional, que é a capacidade de fazer relações entre diferentes representações. Quando um estudante adquire fluência conexional, ele passa a conceber as representações como os especialistas. Além disso, Silva (2018) ressalta a importância do desenvolvimento de habilidades visuoespaciais para a manipulação mental de moléculas em três dimensões. O autor destaca que tais habilidades podem ser treinadas a partir de exercícios de rotação mental e manipulação de modelos físicos.

Em suma, os autores referenciados na categoria “habilidades espaciais/ funções cognitivas” se debruçaram sobre aspectos visuoespaciais importantes para a aprendizagem de química. Uma característica dessa categoria é que a aprendizagem do conteúdo em si não é o

foco, mas o entendimento de como se dá a mediação da aprendizagem a partir da manipulação física e mental de modelos moleculares.

#### 2.1.5.2 Relação estrutura-propriedade

A linguagem química desempenha um papel importante na compreensão dos fenômenos da natureza e suas apropriações para o desenvolvimento da sociedade. Dessa forma, ao ensinar química, espera-se que os estudantes adquiram experiências e meios de se expressar adequadamente frente aos problemas cotidianos, a partir do conhecimento e interpretação de fenômenos químicos. No entanto, verifica-se que a dissociabilidade existente entre a linguagem simbólica da química e sua funcionalidade tem invalidado o real objetivo de aprender química.

Nesse sentido, a categoria relação estrutura-propriedade reúne autores preocupados com a questão do entendimento das propriedades químicas e físicas da matéria a partir da linguagem química em seus níveis simbólico, submicroscópico e macroscópico.

Baldock *et al.* (2021) destacam que a aprendizagem de conceitos como forças intermoleculares são essenciais para o entendimento das propriedades dos materiais. Segundo os autores, a aprendizagem por investigação no laboratório (metodologia ativa) é uma das possibilidades para os estudantes criarem representações simbólicas de moléculas, relacionando-as às observações físicas e explicando com base em construtos teóricos no nível submicroscópico.

A realização de experimentos como o apresentado por Baldock *et al.* (2021) promove o entendimento da relação estrutura-propriedade da matéria, uma vez que estimula o trabalho ativo dos estudantes em contextos significativos, já que, para esses autores, ainda existe uma carência de contexto para a aquisição de conceitos científicos, levando a resultados insatisfatórios.

A partir de um currículo baseado no desenvolvimento progressivo de conceitos por meio de ideias centrais (interações eletrostáticas e de ligação, estrutura e propriedades atômicas/moleculares, energia e estabilidade e mudança em sistemas químicos), Stowe *et al.* (2019) evidenciaram que os estudantes podem desenvolver, organizar e aplicar seus conhecimentos para dar sentido aos fenômenos em nível molecular. Nesse contexto, o problema posto pelos autores traz a dificuldade dos estudantes em relacionar diferentes níveis do conhecimento químico (Johnstone, 1982, 1991), impedindo-os de estabelecer relações “estrutura-propriedade” significativamente.

A importância da relação entre estrutura e propriedade da matéria também é ressaltada por Cooper *et al.* (2012), quando afirmam que essa relação é necessária para evitar a reprodução de ações frequentemente vistas como desconexas e sem propósito. Além disso, enfatizam que a proficiência química requer que conexões entre estrutura e função sejam feitas espontaneamente e automaticamente pelos estudantes. Os referidos autores desenvolveram e validaram um teste diagnóstico de concepções para avaliar até que ponto os estudantes reconhecem as propriedades das substâncias a partir da estrutura de Lewis.

Em resumo, os autores abordam a relação “estrutura-propriedade” a partir de três objetivos diferentes, provocando perspectivas quanto ao trabalho no viés da aprendizagem por investigação (Baldock *et al.*, 2021), à configuração de um currículo baseado em ideias centrais (Stowe *et al.*, 2019) e à possibilidade de investigação das concepções dos estudantes por meio de um instrumento diagnóstico (Cooper *et al.*, 2012).

#### 2.1.5.3 Diagnóstico de erros conceituais

A noção de erro conceitual é essencial para que os educadores busquem estratégias de ensino e aprendizagem baseadas nos conhecimentos prévios dos estudantes. O problema da aprendizagem na maioria das vezes está no fato de existirem conhecimentos prévios não condizentes com o arranjo teórico de determinada área. Assim, verifica-se que estudantes não chegam na sala de aula desprovidos de conhecimentos acerca de ciências, mas possuem erros conceituais acerca de variados fenômenos, podendo se configurar como obstáculos à aprendizagem de conceitos científicos (Karonen *et al.*, 2021).

Karonen *et al.* (2021) sugerem que estruturas do conhecimento do estudante podem passar por uma profunda reorganização, ou processo de mudança conceitual. Os autores evidenciaram que a mudança conceitual pode acontecer ao longo das aulas de química e levar os estudantes a adquirir e aplicar conhecimentos a partir de diferentes repertórios conceituais.

O estudo de concepções alternativas comumente leva ao diagnóstico de erros conceituais dos estudantes, oriundos da visão de ciências pelas lentes da experiência cotidiana e da sala de aula. Portanto, a identificação desses erros por meio de instrumentos de pesquisa é primordial, tendo em vista que nem sempre os estudantes ou educadores percebem que esses equívocos estão impedindo a compreensão do assunto ou que possivelmente se tornará um problema em outros contextos. Assim, a partir do conhecimento dos erros conceituais é possível alinhar estratégias de ensino visando as dificuldades encontradas.

Nesse sentido, apresenta-se (Quadro 5) os principais erros conceituais relacionados à geometria molecular apontados pelos autores da categoria “diagnóstico de erros conceituais”. Enquanto a maioria dos autores desenvolveram e aplicaram um questionário para a identificação dos erros conceituais dos estudantes, outros o abordaram de forma teórica.

Quadro 5 – Relação dos principais erros conceituais relacionados à geometria molecular

Erro conceitual	Abordado por Autor (ano)
A forma das moléculas se deve apenas à repulsão entre os pares de elétrons ligantes.	Birk e Kurtz (1999); Özmen <i>et al.</i> (2008)
A forma das moléculas é devida apenas à repulsão entre pares de elétrons não ligantes.	Birk e Kurtz (1999); Özmen <i>et al.</i> (2008)
A forma das moléculas é devida apenas ao número de átomos ligados ao átomo central.	Özmen <i>et al.</i> (2008)
Para as moléculas BeBr <sub>2</sub> e SCl <sub>2</sub> , suas geometrias moleculares são lineares e os tipos híbridos são sp <sup>3</sup> .	Uyulgan <i>et al.</i> (2014)
A regra do octeto se aplica a todos os exemplos.	Karonen <i>et al.</i> (2021)
Xe não pode formar ligações, pois é um gás nobre.	Uyulgan <i>et al.</i> (2014)
A fórmula molecular orienta necessariamente a ordem dos átomos durante o desenho da sua representação estrutural.	Karonen <i>et al.</i> (2021)
Modelos moleculares (bolas e varetas) não têm relações com concepções teóricas (regra do octeto, estrutura de Lewis)	Karonen <i>et al.</i> (2021); Stowe <i>et al.</i> (2019)
A ligação formada por um átomo de carbono (C) com o átomo de hidrogênio (H) é chamada de ligação de hidrogênio.	Akkuzu e Uyulgan (2016)
Para as moléculas NH <sub>3</sub> e NF <sub>3</sub> , se as geometrias das moléculas têm uma forma piramidal trigonal, os ângulos de ligação não podem ser diferentes.	Uyulgan <i>et al.</i> (2014); Clauss <i>et al.</i> (2014)
A Teoria da Repulsão dos Pares de Elétrons da Camada de Valência se aplica a todos os exemplos.	Lamoureux e Ogilvie (2019a, 2019b).

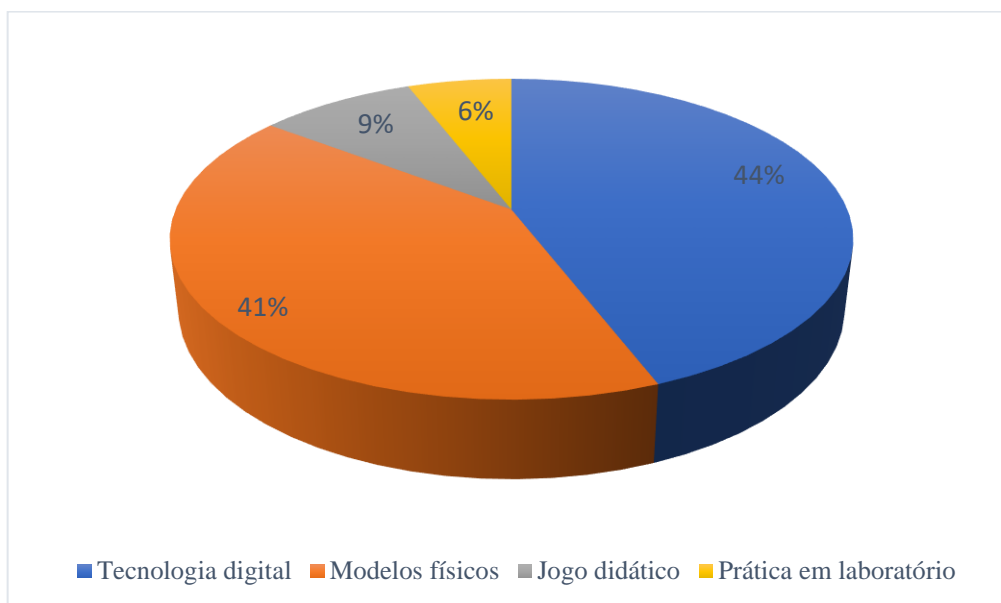
Fonte: Os autores.

Uma série de erros conceituais associadas à aprendizagem de geometria molecular foi identificada, permitindo-nos conhecer algumas particularidades em torno do conteúdo em si e de outros que normalmente o antecedem. Conforme relatado pelos autores, esses erros conceituais impedem o entendimento de aspectos importantes da geometria molecular, de modo que os estudantes avançam de nível escolar com uma compreensão equivocada dos fenômenos moleculares.

#### 2.1.5.4 Estratégias didáticas

A maior parte dos trabalhos analisados se enquadra na categoria “estratégias didáticas”, que se refere aos estudos com ênfase em propostas e intervenções em sala de aula para tornar o ensino e aprendizagem de geometria molecular mais significativo. Destaca-se a utilização de tecnologias digitais e modelos físicos (Figura 3) como estratégia frequente para lidar com as questões visuoespaciais.

Figura 3 – Distribuição percentual dos 34 trabalhos sobre estratégias didáticas



Fonte: Os autores.

No plano da tecnologia digital, a aplicação e desenvolvimento de ferramentas didáticas figuram como os principais propósitos das quinze pesquisas analisadas. De um lado, há nove trabalhos que enfatizam a aplicação de simuladores 3D, com o objetivo de promover a visualização e manipulação de estruturas moleculares tridimensionais.

A utilização de simulações interativas PhET, da Universidade de Colorado em Boulder (EUA), foi feita por Santos (2019), Manfio (2019) e Bacega (2020), os quais reportaram resultados positivos na aprendizagem de geometria molecular, principalmente por propiciar uma melhor visualização/percepção da transição entre representações bidimensionais e tridimensionais. Com objetivos similares, Abualia *et al.* (2016), Özmen *et al.* (2008), Bolton *et al.* (2008) também aplicaram simulações 3D em suas atividades pedagógicas. As aplicações mencionadas têm em comum a utilização de simulações 3D em forma de animações que podem ser acessadas a partir de um computador ou smartphone, com possibilidade de interação dos estudantes, os quais podem mover os objetos 3D para visualizá-los por diferentes perspectivas. Já os pesquisadores Neto (2007) e Carvalho (2009) trabalharam em sala de aula o software livre *ChemSketch*, da *ACD/Labs*, que consiste em um programa de computador para modelar e visualizar estruturas moleculares bidimensionais e tridimensionais. Rocha *et al.* (2021) embarcaram na tecnologia de realidade aumentada – uma tendência em visualização de objetos 3D – para avaliar o desempenho dos estudantes enquanto trabalhavam com o aplicativo de celular *Molecular Geometry – Mirage*.

Do outro lado, há seis trabalhos que enfatizam o desenvolvimento de softwares de computador (Moura, 2010; Silva, 2015), aplicativos de celular (Abdinejad *et al.*, 2021; Araújo, 2019; Silva, 2018) e holograma (Almeida; Lima, 2019) para facilitar a visualização de moléculas em três dimensões. Todas as ferramentas desenvolvidas se mostraram funcionais, obtendo feedback positivo dos estudantes.

Verifica-se que os trabalhos com proposições de estratégias com tecnologias digitais são orientados por uma perspectiva construtivista, destacando-se a importância da aprendizagem ativa e significativa, da construção do conhecimento, do diálogo e interação social, do papel do professor como facilitador (Coll *et al.*, 2006). Dessa forma, a aprendizagem por computador ou smartphone é tida como uma oportunidade de aprimoramento da experiência em sala de aula (Araújo, 2019; Abdinejad *et al.*, 2021; Bolton *et al.*, 2008; Almeida; Lima, 2019; Moura, 2010; Silva, 2014), enquanto os objetos de aprendizagem tecnológicos servem como materiais potencialmente significativos para promover uma aprendizagem significativa (Rocha *et al.*, 2021; Santos, 2019; Manfio, 2019; Bacega, 2020).

A questão da visualização em química é abordada sob diferentes perspectivas para justificar o ensino e aprendizagem de estruturas moleculares. Pode-se extrair de Neto (2007), por exemplo, que a modelagem molecular atua como preceito teórico para se estudar fenômenos químicos, principalmente por não sermos capazes de enxergar para além do nível macroscópico. Por falar em nível macroscópico, Bolton *et al.* (2008) trazem os três níveis do conhecimento químico (submicroscópico, macroscópico e simbólico) de Johnstone (1982) como elementos a serem trabalhados por meio da aprendizagem ativa.

Carvalho (2009) contribui trazendo a Teoria dos Campos Conceituais de Gerárd Vergnaud para estudar representações simbólicas, tais como estruturas moleculares, a partir de situações e suas relações com os conceitos envolvidos no processo de aprendizagem. Considerando as especificidades do aprender conceitos científicos, Özmen *et al.* (2008) relatam que os erros conceituais podem ser ressignificados a partir de uma mudança conceitual, a qual pode ocorrer por meio da instrução em sala de aula.

Inspirados na estrutura de pensamento apresentada em Carillo *et al.* (2005), Abualia *et al.* (2016) aplicaram uma estratégia didática baseada nos procedimentos de modelagem, observação, reflexão e explicação. Nessa perspectiva, os estudantes são incentivados a organizar e compartilhar suas ideias com o grupo (modelagem), observar os fenômenos macroscópicos, refletir acerca dos dados coletados e gerar um modelo explicativo (Mattox *et al.*, 2006).

Outros pressupostos teóricos importantes foram apresentados por Silva (2018), que ressaltou a necessidade da regulação de funções cognitivas como emoção, atenção e memória durante as experiências de aprendizagem de geometria molecular, na tentativa de alcançar a compreensão de modelos tridimensionais por meio do desenvolvimento de habilidades visuoespaciais. Assim, constata-se que há uma diversidade de abordagens teóricas quando o assunto é desenvolvimento e/ou aplicação de tecnologias digitais para o ensino de geometria molecular.

No plano dos modelos físicos, entram em jogo quatorze trabalhos cuja abordagem didática inclui o desenvolvimento e/ou aplicação de modelos moleculares físicos para aprimorar a experiência de aprendizagem de geometria molecular. Savchenkov (2020) e Andrade (2019) apresentam em comum uma proposta de impressão de moléculas tridimensionais por meio de impressora 3D, considerando-se o acesso cada vez mais facilitado desse equipamento nos contextos escolares.

Verifica-se que a maioria das pesquisas envolvendo a utilização de modelos físicos sugere que materiais alternativos sejam aproveitados. Dessa forma, há uma variedade de possibilidades para a construção criativa de modelos moleculares com o objetivo de “tornar visível o invisível”, facilitando a compreensão das propriedades e estrutura dos compostos estudados. Cane e Williams (2018), Silva e Fonseca (2021), Martins (2017) optaram pela construção de moléculas com bolas de isopor e palitos, constituindo-se em uma maneira acessível e frequentemente adotada por professores da Educação Básica. No entanto, modelos moleculares físicos construídos com argila (Donaghy; Saxton, 2012), origami (Maia, 2019), balão de festa (Bouzon, 2015) e garrafa PET (Fabri, 2016) também se mostraram funcionais para o alcance dos objetivos dos pesquisadores.

Em decorrência da natureza visual da geometria molecular, nota-se que há uma preocupação importante com estudantes com deficiência visual, resultando em pesquisas para a construção de materiais táteis alternativos (Ribeiro *et al.*, 2018; Barros, 2018; Bertalli, 2010). Dessa forma, evidencia-se que modelos moleculares físicos alternativos contribuem para o ensino e aprendizagem de geometria molecular (Martins *et al.*, 2018; Sebata, 2006).

Assim como no caso da aplicação de tecnologias digitais, as abordagens teóricas dos trabalhos que sugerem a aplicação de modelos moleculares físicos variam de acordo as necessidades de pesquisa de cada autor. A questão da valorização dos conhecimentos prévios para se alcançar uma aprendizagem significativa é abordada por Bouzon (2015) e Martins (2017), os quais reforçam a importância dos modelos físicos enquanto materiais potencialmente

significativos. Seguindo a linha de abordagem teórica educacional geral para compreender os processos de aprendizagem de química, Andrade (2019), Maia (2019), Bertalli (2010) e Maia (2019) citam Vygotsky para justificar a importância da mediação do professor no processo de aquisição de conhecimentos, valorizando-se, portanto, o contexto e as interações sociais.

Ribeiro *et al.* (2018) e Barros (2018) optaram por ressaltar a importância e necessidade de se adequar os materiais didáticos para atender o público com deficiência visual, destacando as possibilidades de construção de modelos físicos para ensinar química. Mais voltado às dificuldades de visualização em química, Savchenkov (2020) e Donaghy e Saxton (2012) discorrem brevemente acerca das habilidades espaciais enquanto capacidade essencial à compreensão e manipulação mental de modelos tridimensionais.

Os níveis do conhecimento químico de Johnstone (1982) são citados novamente, agora em Cane e Williams (2018), em defesa da superação de erros conceituais por meio de estratégias que viabilizem a abordagem dos níveis submicroscópico, macroscópico e simbólico. Outra característica que reaparece tem a ver com a discussão das dificuldades de aprendizagem de geometria molecular (Martins *et al.*, 2018), de modo que a falta de motivação (Fabri, 2016) também é levada em consideração, uma vez que pode estar associada a escolhas didáticas inapropriadas.

Sebata (2006) apresenta uma abordagem curiosa da questão das representações em termos de nível de iconicidade, que depende do grau de realismo de uma imagem. Assim, enquanto a mera descrição de uma imagem tem nível de iconicidade 0 na escala proposta por Abraham Moles e citada por Carneiro (1997), o próprio objeto da imagem ganha o nível máximo, 12. Essa escala é importante para o planejamento, implementação e avaliação de atividades cujo objetivo é desenvolver a capacidade de transição entre diferentes níveis de iconicidade, para que os estudantes se familiarizem, por exemplo, com diferentes versões de representações de um mesmo conceito.

Ilustrando mais uma possibilidade de compreensão da aprendizagem de geometria molecular com base em teorias diversas, Maia (2019) se inspirou na Teoria Geral dos Signos de Charles Peirce para estudar as representações moleculares com base na tríade semiótica signo-objeto-interpretante. Posto brevemente, a representação bidimensional ou tridimensional de uma molécula é um signo, que está associado ao objeto (molécula) e que depende do interpretante (construtos teóricos) para ser interpretado por alguém. Isso sugere que a lógica da tríade semiótica pode contribuir para o ensino de química, no sentido de explicar e evitar possíveis ruídos no estabelecimento de relações entre os três elementos que a constitui.

Ainda no rol de trabalhos que sugerem a aplicação de modelos moleculares físicos, outra abordagem que chama a atenção é apresentada por Silva e Fonseca (2021), quando trazem uma estratégia multissensorial como proposta para o ensino de geometria molecular. Para os autores, a integração de informações adquiridas pelas vias sensoriais responsáveis pelo tato, paladar, olfato, audição e visão pode favorecer a consolidação de memórias de longo prazo.

Dos trabalhos analisados, três sugerem a aplicação de jogo didático para ensinar geometria molecular. Silva (2020) e Silva e Soares (2021) desenvolverem um jogo de tabuleiro para promover um ensino que alia o caráter lúdico e pedagógico dos jogos didáticos. Os autores analisaram os resultados com base na Teoria Computacional da Mente, revelando-se como um método inovador, ao integrar diferentes pressupostos para compreender o processo de aprendizagem por meio do jogo. Nessa perspectiva, considera-se que as informações do ambiente (*input*) são processadas pelo sistema nervoso e armazenadas em forma de conhecimento (*output*). Já o terceiro trabalho sobre jogo didático destaca o desenvolvimento e aplicação de um jogo de cartas denominado “dominó geométrico” (Silva, 2016). Trata-se de uma estratégia lúdica com o objetivo de estimular a associação de estruturas de Lewis às respectivas nomenclaturas geométricas. Alguns pressupostos da Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel também foram discutidos pelo autor, sugerindo que o jogo didático pode ser uma ferramenta potencialmente significativa.

Por fim, duas estratégias didáticas são direcionadas para a prática em laboratório (Baldock *et al.*, 2021; Ogden, 2017). Os autores desses trabalhos sinalizam a importância da experimentação para a compreensão dos aspectos estruturais e funcionais das substâncias. Nesse sentido, a prática experimental permite que os estudantes manipulem, observem e reflitam acerca dos fenômenos químicos para alcançar os conhecimentos necessário e, conseqüentemente, gerar modelos explicativos.

Em resumo, todas as estratégias didáticas apresentadas foram bem avaliadas pelos pesquisadores e estudantes participantes. Verificou-se que as abordagens teóricas e metodológicas trazidas incorporam discursos heterogêneos que possibilitam a articulação de fundamentos teóricos em favor da compreensão de contextos particulares.

### **2.1.6 Discussão, conclusões e implicações**

A identificação e análise das quatro categorias – habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, erros conceituais e estratégias didáticas – foram de suma importância para a

compreensão das dificuldades dos estudantes e das características dos métodos de ensino empregados. Quando o assunto é aprender geometria molecular, as pesquisas mostram que a questão representacional não pode ser deixada de lado, uma vez que a percepção, visualização e manipulação mental de modelos moleculares requisitam habilidades que não estão diretamente associadas à compreensão conceitual. Ou seja, é possível aprender conceitos de ligação química e repulsão eletrônica e não ser capaz de visualizar (interpretar) uma representação bidimensional e/ou tridimensional adequadamente (Silva; Correia, 2023b).

De modo semelhante, nem sempre as relações entre estrutura e propriedade das substâncias são explicitadas e compreendidas quando o estudante está aprendendo geometria molecular. Esse fato mostra que é importante avaliar as limitações da compreensão do estudante. Não basta saber desenhar estruturas de Lewis e prever a estrutura molecular a partir da noção de repulsão dos pares eletrônicos, é crucial compreender as implicações das estruturas nas propriedades das substâncias.

Dessa forma, em resposta às questões da pesquisa, as dificuldades dos estudantes quanto à aprendizagem de geometria molecular envolvem a falta de habilidade espacial para lidar com aspectos representacionais, a desconexão entre estrutura e propriedade das substâncias, e a recorrência de erros conceituais que inviabilizam a aprendizagem significativa. Quanto às características dos métodos de ensino empregados, observou-se a prevalência de recursos didáticos como tecnologias digitais, modelos físicos, jogos didáticos e práticas em laboratório utilizados para minimizar as dificuldades de aprendizagem associadas, principalmente, à visualização.

A partir das análises conduzidas na presente revisão sistemática da literatura foi possível identificar lacunas que poderão direcionar futuras investigações nesta área do conhecimento. As lacunas se apresentam, principalmente, em termos de problemas quanto: 1) à relação da questão da visualização em química com o desenvolvimento de habilidades espaciais; 2) à identificação de erros conceituais relacionados não só a conceitos de geometria molecular, mas à questão da espacialidade; 3) à perspectiva de professores de química acerca do ensino e aprendizagem de geometria molecular.

A visualização em química é frequentemente associada à capacidade de realizar operações mentais de moléculas tridimensionais. São poucos os trabalhos que trazem explicitamente a necessidade de desenvolvimento de habilidades espaciais para a compreensão de geometria molecular. Além disso, dos trabalhos analisados, com apenas a representatividade de Ferk *et al.* (2003), evidencia-se que raramente aparecem pesquisas de cunho psicológico

para analisar a percepção da visualização e manipulação de estruturas tridimensionais sob diferentes condições experimentais. Verificou-se que tecnologias digitais com realidade aumentada têm desempenhado um papel essencial para a visualização e manipulação de moléculas tridimensionais.

O cenário nacional de pesquisas da área é preocupante quando falamos de investigação de erros conceituais associados à geometria molecular. Conforme apresentado no item “diagnóstico de erros conceituais”, existem erros advindos da experiência do estudante e da própria prática do professor. Portanto, importantes para serem identificados e ressignificados. Além de reforçar os achados internacionais, a realização de pesquisas nacionais é crucial para a identificação de possíveis particularidades quanto à concepção de geometria molecular. Considerando a natureza espacial do conteúdo, cabe pesquisar erros conceituais associados à espacialidade (Silva; Correia, 2023a).

Nota-se que a experiência do professor tem sido pouco aproveitada para o levantamento das dificuldades de aprendizagem dos estudantes. Portanto, faltam pesquisas para a investigação da perspectiva de professores de química acerca do ensino e aprendizagem de geometria molecular. Com efeito, embora seja possível identificar as dificuldades a partir da pesquisa com estudantes, os professores podem contribuir por meio da sua experiência em sala de aula e revelar situações eventualmente imperceptíveis pelos estudantes (Silva; Correia, 2024).

Complementarmente, convidamos à reflexão da importância da condução de pesquisas centradas na investigação de como se dá a organização do currículo e sua implicação na elaboração de materiais didáticos. No caso da geometria molecular, Silva *et al.* (2020) sugerem uma proposta de análise de documentos oficiais e livro didático com base na Teoria Antropológica do Didático (Chevallard, 1992). Os resultados revelaram que a ausência ou desarticulação de técnicas, tecnologias e teorias podem dificultar a realização de tarefas sobre geometria molecular. Outra possibilidade de pesquisa e/ou estratégia de ensino inclui a abordagem da história da geometria molecular, a partir do artigo de Silva, Freitas e Fonseca (2018), os quais reuniram elementos teóricos importantes para a compreensão do desenvolvimento histórico e epistemológico deste saber.

A principal diferença dos contextos nacionais e internacionais está no fato de que há uma variedade de linhas de investigação nas pesquisas internacionais, enquanto nas pesquisas nacionais há ênfase na elaboração e aplicação de estratégias didáticas. A natureza espacial do conteúdo tem despertado educadores para a proposição de recursos pedagógicos alternativos

físicos e digitais, na tentativa de superar o obstáculo da visualização em química (Silva; Correia, 2023b). Portanto, espera-se uma tendência de crescimento de pesquisas que lidem com outros aspectos da geometria molecular, considerando que pesquisas com estudantes têm revelado essa necessidade (Silva, 2018).

Os grandes temas de química presentes na BNCC possuem estreita relação com o estudo da noção de geometria molecular, ainda que não esteja explicitada. Ressalta-se a potencialidade desta RSL para informar a elaboração de estratégias de ensino que valorizem o desenvolvimento de habilidades espaciais e a compreensão das propriedades dos materiais por meio do estudo da estrutura atômica e molecular. É importante, também, atentar-se aos recorrentes equívocos na aprendizagem para evitar a internalização de erros conceituais. Nesse sentido, cabe ao educador buscar oportunidades – dentro das unidades de conhecimento da BNCC – para incorporar o ensino deste saber em contextos diversos, podendo lançar mão, por exemplo, de metodologias e recursos didáticos apresentados neste levantamento.

Em suma, as lacunas apontadas oferecem perspectivas aos leitores para que novas pesquisas sejam conduzidas visando uma melhor compreensão de diferentes aspectos da aprendizagem de geometria molecular.

## 2.2 PERSPECTIVA DOCENTE ACERCA DA APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR: ANÁLISE DE ENTREVISTA MEDIADA COM MAPA CONCEITUAL<sup>3</sup>

A preocupação com questões específicas sobre o ensino de química tem norteado pesquisas empíricas de modo que os dados coletados derivam das experiências de aprendizagem dos próprios estudantes. No entanto, uma lacuna de pesquisa tem sido identificada pela falta de investigação da percepção dos professores acerca da aprendizagem de geometria molecular, tendo em vista que eles são fonte de informações relevantes oriundas, principalmente, das experiências de sala de aula.

O objetivo desta pesquisa foi fazer um levantamento de concepções docentes atreladas à aprendizagem – pelos estudantes – dos principais conceitos de geometria molecular. Enquanto estratégia de investigação, utilizou-se uma entrevista estruturada de pesquisa mediada por mapa

---

<sup>3</sup> O conteúdo desta seção secundária foi publicado em periódico científico com antecedência. Utilize a referência a seguir para citar alguma passagem específica desta seção: SILVA, K. S.; CORREIA, P. M. Perspectiva docente acerca da aprendizagem de geometria molecular: análise de entrevista mediada com mapa conceitual. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 14, n. 1, p. 82-97, 2024. DOI: 0.31512/encitec.v14i1.1099.

conceitual para explicitar conceitos e, a partir da discussão deles, identificar as concepções dos docentes.

As contribuições dos docentes permearam quatro linhas de discussão acerca da aprendizagem de geometria molecular: habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, estratégias didáticas e erros conceituais. Os resultados deste estudo reafirmam a importância de considerar não apenas as expectativas e desafios dos estudantes, mas também os insights dos docentes, que, por meio de suas experiências, podem contribuir para a criação de ambientes de aprendizagem mais eficazes.

### 2.2.1 Introdução

O ensino de geometria molecular tem chamado a atenção de educadores que se propõem a investigar fenômenos de aprendizagem no âmbito do ensino de química (Ribeiro; Sutério; Bastos, 2018; Silva, 2018; Silva; Soares, 2021). A compreensão das propriedades químicas e físicas das substâncias depende da aquisição de conhecimentos relativos à noção de estrutura molecular, motivo pelo qual diversas estratégias de ensino têm sido propostas para superar a dificuldade de visualização de estruturas tridimensionais (Bacega, 2020; Manfio, 2019).

Do ponto de vista dos objetivos de pesquisas recentes sobre geometria molecular, destacam-se as preocupações com:

- o desenvolvimento de habilidades espaciais para lidar com múltiplas representações (Ferk *et al.*, 2003);
- a importância da relação estrutura-propriedade para que a aprendizagem faça sentido (Stowe *et al.*, 2019);
- o desenvolvimento de estratégias didáticas para facilitar a visualização de estruturas tridimensionais por meio de tecnologias digitais e materiais alternativos (Silva; Fonseca, 2021);
- o diagnóstico de erros conceituais para evitar práticas que possam gerar equívocos (Karonen *et al.*, 2021).

A preocupação com questões específicas da disciplina de química tem norteado pesquisas empíricas de modo que os dados coletados derivam das experiências de aprendizagem dos próprios estudantes. No entanto, uma lacuna de pesquisa tem sido identificada pela falta de investigação da percepção dos professores acerca da aprendizagem de geometria molecular, tendo em vista que eles são fonte de informações relevantes oriundas, principalmente, das experiências de sala de aula.

Nesse sentido, defendemos que as preocupações de pesquisa destacadas anteriormente também devem ser analisadas do ponto de vista docente, por meio do diagnóstico de suas concepções acerca da aprendizagem de geometria molecular. A identificação do entendimento dos docentes pode contribuir para informar práticas de ensino de modo personalizado, uma vez que o compartilhamento de experiências discentes e docentes tende a explicitar os problemas de aprendizagem de forma mais precisa.

O propósito fundamental desta pesquisa consistiu em realizar um levantamento das concepções dos docentes relacionadas à aprendizagem dos estudantes acerca dos principais conceitos de geometria molecular. Realizou-se uma entrevista mediada com mapa conceitual para explicitar conceitos relacionados com a geometria molecular e, a partir da discussão deles, identificar as concepções dos docentes. Os resultados foram analisados com base nos fundamentos da aprendizagem de geometria molecular e mostram um panorama das principais questões de aprendizagem enfrentadas, a partir da perspectiva dos docentes entrevistados.

### **2.2.2 O ensino de geometria molecular**

Há diferentes questões que podem ser estudadas do ponto de vista da aprendizagem de geometria molecular. Alguns trabalhos recentemente publicados na literatura destacam:

- a necessidade do desenvolvimento de habilidades espaciais para manipular e compreender diferentes representações (Martina, 2017; Rahmawati; Dianhar; Arifin, 2021);
- a importância de uma aprendizagem pautada na relação estrutura-propriedade das substâncias (Baldock; Blanchard; Fernandez, 2021);
- estratégias didáticas que exploram ferramentas digitais e/ou alternativas (Bacega, 2020);
- equívocos de aprendizagem com base no diagnóstico de erros conceituais (Stowe *et al.*, 2019).

Os modelos desempenham um papel crucial na representação de conceitos complexos e abstratos em química. A compreensão da química está intrinsecamente ligada a habilidades espaciais, como visualização, orientação e relações espaciais (Rahmawati, Dianhar; Arifin, 2021). De acordo com Barnea (2000), a visualização implica a capacidade de transitar entre representações bidimensionais e tridimensionais. A orientação espacial refere-se à habilidade de conceber uma representação a partir de perspectivas distintas. As relações espaciais envolvem a capacidade de manipular mentalmente tais representações.

A aplicação das habilidades espaciais para resolver problemas de geometria molecular pode revelar a presença de competências representacionais. Martina (2017) identificou duas competências ligadas a representações visuais individuais: compreensão visual e fluência

visual. Em casos de múltiplas representações visuais, surgem as competências de compreensão conexional e fluência conexional. Essas quatro competências representacionais indicam diferentes níveis de compreensão de representações. Tanto Barnea (2000) quanto Martina (2017) destacam a importância do uso contínuo de várias representações para desenvolver proficiência espacial.

O estudo da relação entre estrutura e propriedade busca conectar a terminologia química a fenômenos observáveis. Compreender as noções de geometria molecular é essencial para elucidar as propriedades químicas e físicas das substâncias. Segundo Baldock, Blanchard e Fernandez (2021), a realização de atividades investigativas em laboratórios de química desempenha um papel crucial na construção do entendimento sobre a estrutura da matéria em níveis simbólico, submicroscópico e macroscópico, bem como sua influência na funcionalidade e propriedades dos compostos.

Do ponto de vista dos estudantes, a dificuldade em transitar entre distintos níveis do conhecimento químico tem resultado em uma assimilação de conceitos desvinculados da realidade, negligenciando a conexão entre estrutura e propriedade. Stowe et al. (2019) advogam por um currículo que enfatize a exploração e compreensão das estruturas atômicas e moleculares com base em suas propriedades e aplicações. Portanto, o ensino de geometria molecular deve se harmonizar com várias oportunidades de aplicar e discutir os conhecimentos químicos.

Ao abordar estratégias didáticas, diversas pesquisas destacam o potencial de recursos tecnológicos digitais, modelos físicos, jogos educativos e experiências de laboratório. Frequentemente, a ênfase recai na importância da visualização como elemento fundamental na aprendizagem da geometria molecular. Autores como os mencionados a seguir salientam que, devido à natureza abstrata do conteúdo, é necessário fornecer recursos didáticos que representem moléculas em diversas formas para enriquecer o ensino.

Modelos moleculares virtuais têm sido empregados para simplificar a visualização de moléculas. Intervenções didáticas usando tecnologias digitais renderam resultados positivos em estudos como os de Santos (2019), Bacega (2020) e Rocha *et al.* (2021). Por outro lado, modelos moleculares físicos, como os construídos com bolas de isopor e palitos (Silva; Fonseca, 2021), balões de festa (Bouzon, 2015) e garrafas PET (Fabri, 2016), são frequentemente adotados devido à facilidade de acesso e às oportunidades criativas que oferecem para representações.

Estratégias didáticas para o ensino de geometria molecular incluem o uso de jogos educativos (Silva; Soares, 2021) e atividades em laboratório de química (Ogden, 2017). De

modo geral, todas essas abordagens incorporam recursos dinâmicos para fomentar uma aprendizagem centrada no aluno.

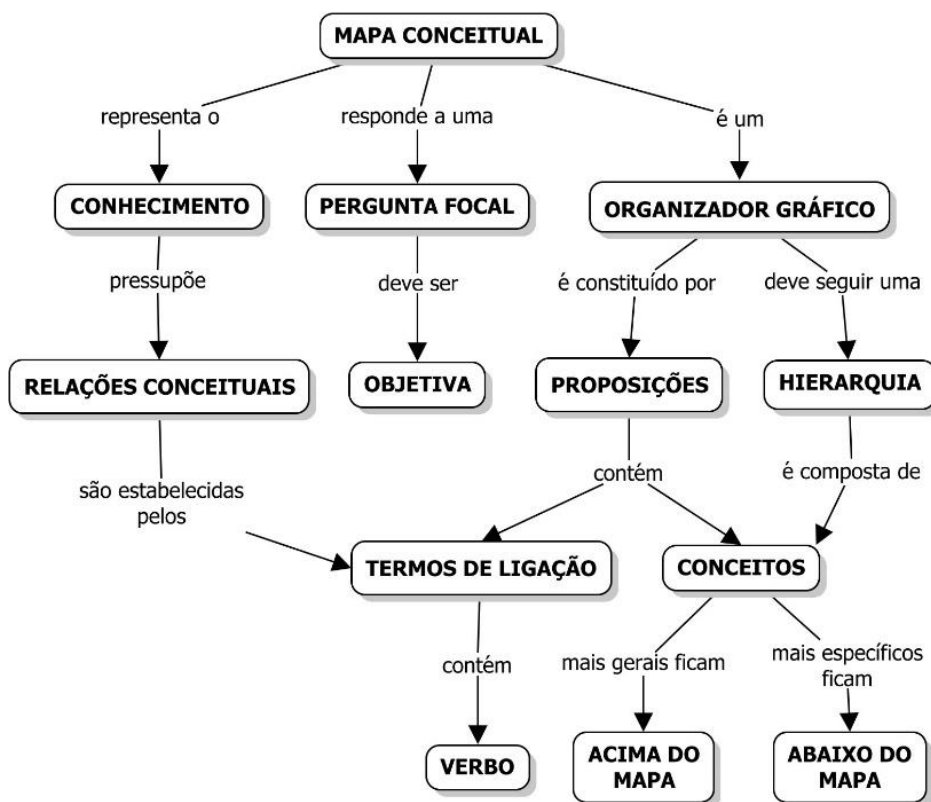
A aplicação de diversas estratégias didáticas evidencia que os estudantes frequentemente possuem concepções equivocadas em relação a conceitos associados à geometria molecular. Por exemplo, a regra do octeto é muitas vezes mal interpretada, resultando em contradições e extensões errôneas da regra. Karonen *et al.* (2021) observam que alguns estudantes não conseguem prever com precisão geometrias moleculares porque acreditam erroneamente que todas as moléculas estabelecem ligações químicas para alcançar estabilidade com dois ou oito elétrons na camada de valência. Outro erro conceitual significativo é considerar que os modelos moleculares servem apenas para melhorar a visualização, sem relação com os fundamentos teóricos que explicam, por exemplo, as propriedades das substâncias (Karonen *et al.*, 2021; Stowe *et al.*, 2019).

Birk e Kurtz (1999) e Özmen, Demircioglu e Demircioglu (2008) constataram que, mesmo quando os alunos compreendem que a forma das moléculas resulta do arranjo eletrônico dos átomos, concepções equivocadas podem persistir. Por exemplo, a repulsão entre pares de elétrons na camada de valência às vezes é erroneamente associada a pares ligantes ou não ligantes em torno do átomo central de uma molécula. Como resultado, os estudantes frequentemente acreditam que a forma das moléculas é determinada pela influência da nuvem eletrônica dos pares de elétrons não ligantes ou pela força eletrônica dos pares de elétrons ligantes, com máxima separação entre átomos. No entanto, muitos alunos não consideram adequadamente as interações mútuas entre os pares de elétrons ligantes e não ligantes.

### **2.2.3 Mapa conceitual como instrumento de pesquisa**

O mapa conceitual (Figura 4) é uma ferramenta para organizar o conhecimento, apresentando uma representação visual e textual que pode ser compreendida por diferentes leitores, inclusive aqueles que não o elaboraram. Ele é formado por proposições contendo conceitos e termos de ligação, estruturados hierarquicamente, com conceitos gerais acima e específicos abaixo. A quantidade de informações é determinada pela pergunta focal, que deve ser precisa e concisa (Silva; Fonseca; Correia, 2020). Ao promover o envolvimento ativo e facilitar a construção de conhecimento, o mapa conceitual emerge como uma ferramenta educacional e de avaliação com grande potencial significativo (Santos; Pauletti, 2022; Oliveira; Cavalcante; Aquino, 2023).

Figura 4 – O que é um mapa conceitual?



Fonte: Adaptado de Silva, Fonseca e Correia (2020).

Aguiar e Correia (2013) afirmam que a qualidade de um mapa conceitual depende de quatro características: clareza semântica das proposições, informações condizentes com a pergunta focal, organização hierárquica dos conceitos, revisão contínua. Dessa forma, as relações existentes entre os conceitos podem ser interpretadas para alcançar a compreensão do “mapeador” acerca de um dado tema.

Ao contrário de percepções comuns, o mapa conceitual não é apenas utilizado como uma ferramenta de avaliação, na qual os alunos o constroem para obter feedback. No ambiente escolar, a limitação de tempo para ensinar os alunos a criar mapas e para revisar suas produções é um obstáculo para a disseminação da técnica de mapeamento conceitual. Uma solução alternativa consiste na elaboração de mapas conceituais pelos próprios educadores, aproveitando a perspectiva especializada para estruturar um mapa. Isso não busca substituir a prática dos alunos na criação de mapas, mas fornecer um modelo que possa ser utilizado para atingir diferentes objetivos (Correia; Cabral; Aguiar, 2016).

Silva, Fonseca e Correia (2020) destacam que mapas conceituais com lacunas, erros, figuras e cores podem ser produzidos por professores e utilizados pelos estudantes como estímulos para a regulação da atenção e memória. Essas estratégias visuais e espaciais são fundamentadas em princípios de aprendizagem e permitem que mapas conceituais pré-

concebidos por especialistas – professores treinados na técnica de mapeamento – sejam aplicados com rapidez e efetividade.

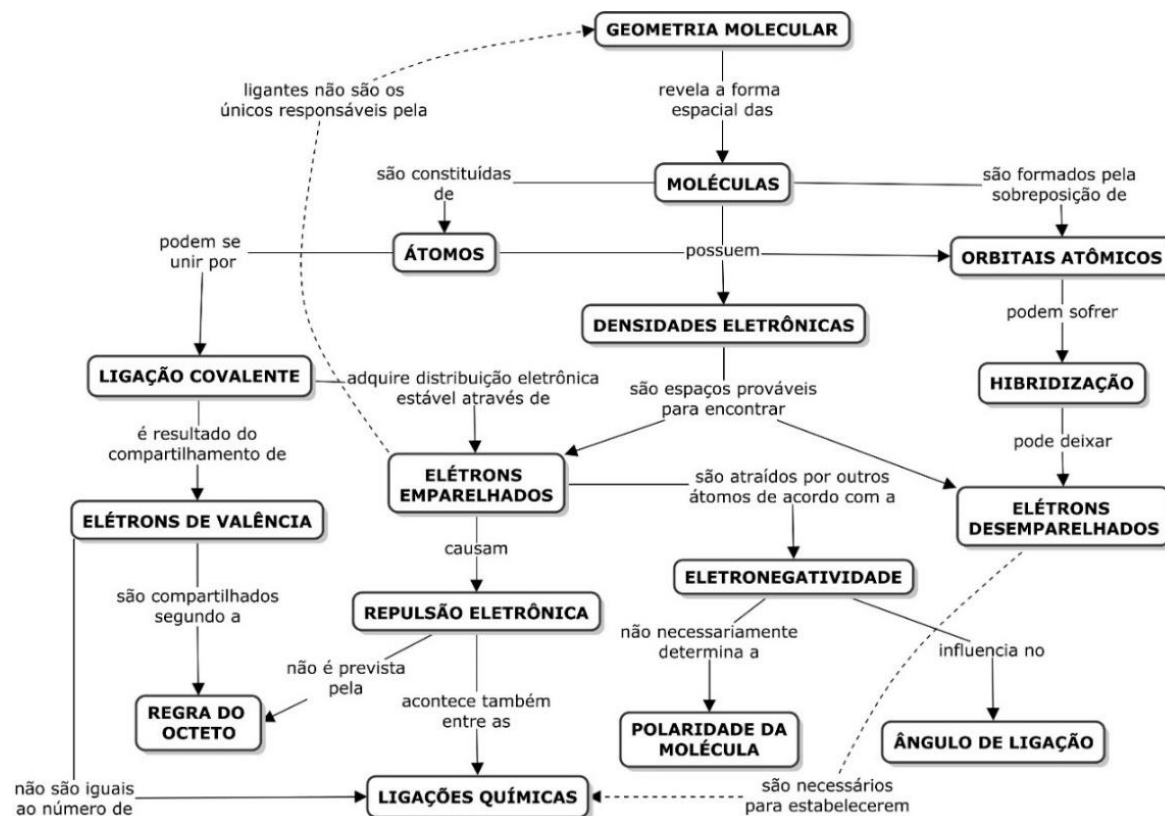
No contexto da ampla variedade de aplicações do mapa conceitual, surge a oportunidade de empregá-lo como ferramenta de pesquisa. Kinchin, Streatfield e Hay (2010) consideram que a coleta de informações através de entrevistas com mapas conceituais pode ser confiável, visto que ambas as ferramentas são estruturadas para explorar a complexidade das questões de pesquisa propostas pelo pesquisador. As vantagens de incorporar mapas conceituais em entrevistas (Heron; Kinchin; Medland, 2018; Aguiar; Correia, 2019) incluem, para os propósitos deste estudo, a capacidade de identificar com mais precisão quais conceitos estão recebendo a atenção do entrevistado, maior flexibilidade para o entrevistador e maior eficiência na revisão, aprimoramento e validação.

#### **2.2.4 Metodologia**

Realizou-se uma pesquisa qualitativa com análise de conteúdo e comparação com a literatura, visando identificar os conceitos-chave e as dificuldades de aprendizagem em geometria molecular conforme percebidos por professores de química. Para essa investigação, foi empregada uma entrevista estruturada de pesquisa, facilitada por um mapa conceitual construído no *CmapTools*.

No início do estudo, os autores deste trabalho, que são professores de química e especialistas em mapeamento conceitual, colaboraram para criar um mapa conceitual. Esse mapa incluiu 16 conceitos e 22 proposições relacionadas aos principais temas da geometria molecular no Ensino Médio e Superior (Figura 5).

Figura 5 – Mapa conceitual utilizado na entrevista docente – o que é geometria molecular?



Fonte: Os autores.

Após essa etapa, dois professores de química do Ensino Superior da Universidade de São Paulo foram convidados a participar de entrevistas individuais e gravadas, realizadas via Google Meet, com duração de 25 minutos cada. Os professores receberam o mapa conceitual com 7 dias de antecedência. Durante as entrevistas, o entrevistador compartilhou a tela do computador, exibindo o mapa conceitual, e pediu aos docentes que lessem cada proposição. Na sequência, foram feitas as seguintes perguntas:

- Quais ajustes você sugere para aprimorar o mapa conceitual?
- De acordo com sua experiência profissional, quais conceitos são cruciais para que os estudantes compreendam a geometria molecular?
- Quais conceitos são mais desafiadores para os estudantes?

Durante as entrevistas, as alterações propostas pelos entrevistados foram implementadas, resultando em novos mapas conceituais individuais. Em seguida, essas modificações foram incorporadas em um mapa colaborativo que combinou as sugestões de ambos os docentes. Essa versão colaborativa dos mapas foi aprovada pelos entrevistados.

A abordagem colaborativa na construção do mapa conceitual permitiu que os docentes entrevistados partissem de um mapa previamente criado pelos autores. Dado que o objetivo da

pesquisa era captar os principais conceitos de interesse dos entrevistados e suas justificativas, o mapa conceitual inicial orientou o processo da entrevista, reduzindo possíveis perdas de informações. Durante o processo, o entrevistador aceitou todas as sugestões dos entrevistados, intercedendo somente com orientações sobre o arranjo espacial mais adequado para os conceitos no mapa.

Todos os aspectos éticos foram garantidos conforme o projeto enviado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Humanos.

## **2.2.5 Resultados e discussão**

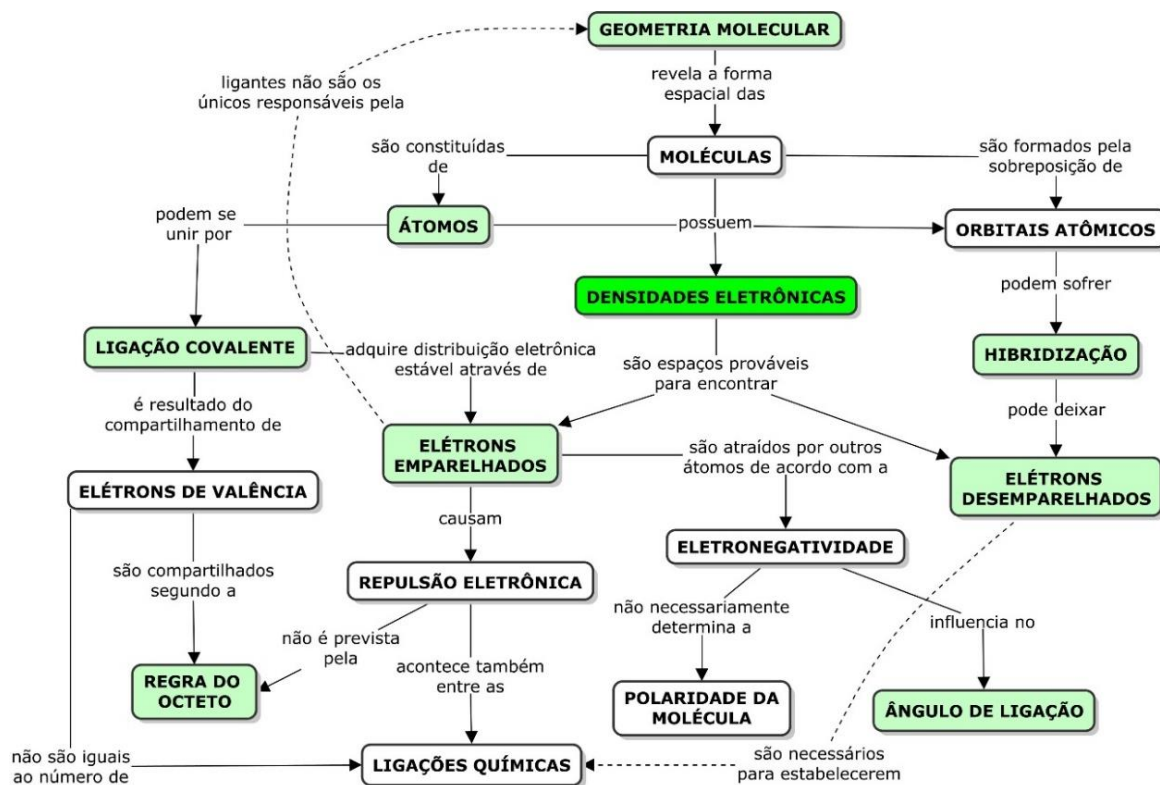
### **2.2.5.1 Docente A**

Um exame amplo dos conceitos explorados pelo docente A (Figura 6) revela uma abrangente análise do mapa conceitual. Ordenados de forma crescente, os conceitos que receberam maior tempo de discussão foram: átomos, ligação covalente, regra do octeto e elétrons desemparelhados (1-2 min.); geometria molecular, ângulo de ligação, hibridização e densidades eletrônicas (2-3 min.); e elétrons emparelhados (3-4 min.). No geral, foram mencionados nove conceitos distintos durante o intervalo de 25 minutos.

No início da entrevista, quando questionado sobre possíveis melhorias no mapa conceitual, o docente prontamente mencionou o conceito de “geometria molecular”. Ele apontou que o termo de ligação “revela a forma espacial das” pode induzir erroneamente à ideia de que as moléculas são estáticas. O docente destacou a dificuldade dos alunos em compreender modelos e sua tendência a não atribuir caráter dinâmico às representações moleculares. Ficou evidente que a ausência de informação no mapa conceitual sobre a natureza tridimensional e conformacional das moléculas pode resultar em erros conceituais e problemas de percepção significativos.

Após uma breve análise para abordar o problema identificado, ficou claro que a ligação entre “geometria molecular” e “moléculas” não representa um problema, desde que um novo conceito seja adicionado para aprofundar a compreensão das moléculas. Conseqüentemente, o docente sugeriu a incorporação do conceito de “ângulo de ligação” como ponto de partida para abordar a questão da dinamicidade das moléculas. Este conceito em particular foi considerado o mais apropriado para a adaptação, devido à sua conexão intrínseca com a conformação das moléculas.

Figura 6 – Conceitos abordados pelo docente A realçados em verde. Destaque para o conceito considerado essencial para a compreensão da noção de geometria molecular.



Fonte: Os autores.

O conceito seguinte mencionado foi “átomos”, que atuou como referência para que o docente pudesse avaliar e aprovar a organização hierárquica dos conceitos na parte esquerda do mapa conceitual. Como resultado, não houve sugestões de alterações. No entanto, na outra parte do mapa, o conceito de “hibridização” despertou a atenção do docente, pois carecia de informações claras para entender que se trata do fenômeno de formação de orbitais híbridos a partir da sobreposição de orbitais atômicos. Como solução, a sugestão foi ajustar as proposições relacionadas ao conceito de “hibridização” para mitigar a rápida transição entre esse conceito e “elétrons desemparelhados”.

O conceito seguinte, “ligação covalente”, foi mencionado no lado esquerdo do mapa conceitual, mas apenas para avaliar e confirmar a organização hierárquica dos conceitos. Conseqüentemente, nenhuma sugestão de alteração foi apresentada. O docente enfatizou que os conceitos à esquerda do mapa estão bem interconectados e transmitindo uma mensagem clara. Entretanto, o conceito “elétrons emparelhados” teve seu termo de ligação com “eletronegatividade” questionado. Para tornar a proposição mais clara, de acordo com o docente, o termo de ligação “são atraídos por outros átomos de acordo com a” poderia ser ajustado para “são atraídos por outros átomos da mesma molécula de acordo com a”. A

justificativa é que ao longo do mapa conceitual se discute átomos de qualquer molécula, mas a proposição em questão se refere a átomos da mesma molécula. Portanto, a revisão do termo de ligação visa minimizar possíveis confusões.

Quando questionado sobre os conceitos mais desafiadores para a compreensão, o docente destacou “elétrons desemparelhados”, enfatizando que a concepção de formação e configuração das moléculas se origina da sobreposição de orbitais atômicos com elétrons desemparelhados. Como meio de evitar mal-entendidos, o docente sugeriu expandir as informações do conceito “regra do octeto”, pois essa regra não deixa claro que existem exceções significativas a serem consideradas. Para abordar isso, é apropriado adicionar proposições que abordem a contratação e extensão da regra do octeto.

De acordo com o docente entrevistado, a dificuldade de desenvolvimento conceitual em relação à geometria molecular pode ser atenuada por meio do estudo das “densidades eletrônicas” e seus impactos na formação e conformação das moléculas. Ele enfatizou que esse conceito é um dos mais essenciais para compreender a natureza dinâmica das moléculas. Dessa forma, a aprendizagem significativa pode ser promovida quando os alunos não apenas utilizam técnicas mnemônicas para categorizar várias geometrias moleculares, mas também compreendem como as densidades eletrônicas afetam a repulsão e o ângulo das ligações.

Embora o docente tenha mencionado nove conceitos presentes no mapa conceitual, fica evidente que a sua preocupação central se concentrou na dinamicidade ou percepção espacial das moléculas. A ausência de elementos visuais e/ou conceitos no mapa conceitual que permitam representar aspectos espaciais levou o docente a refletir além da simples identificação dos principais conceitos de geometria molecular. Nas palavras do docente, o papel da representação “é extremamente importante para a visualização espacial... O que se torna um desafio significativo para a aprendizagem dos alunos. Eles enfrentam dificuldades consideráveis ao tentar visualizar apenas em 2D. Além disso, a capacidade de interação proporcionada pela visualização espacial também é um fator relevante”.

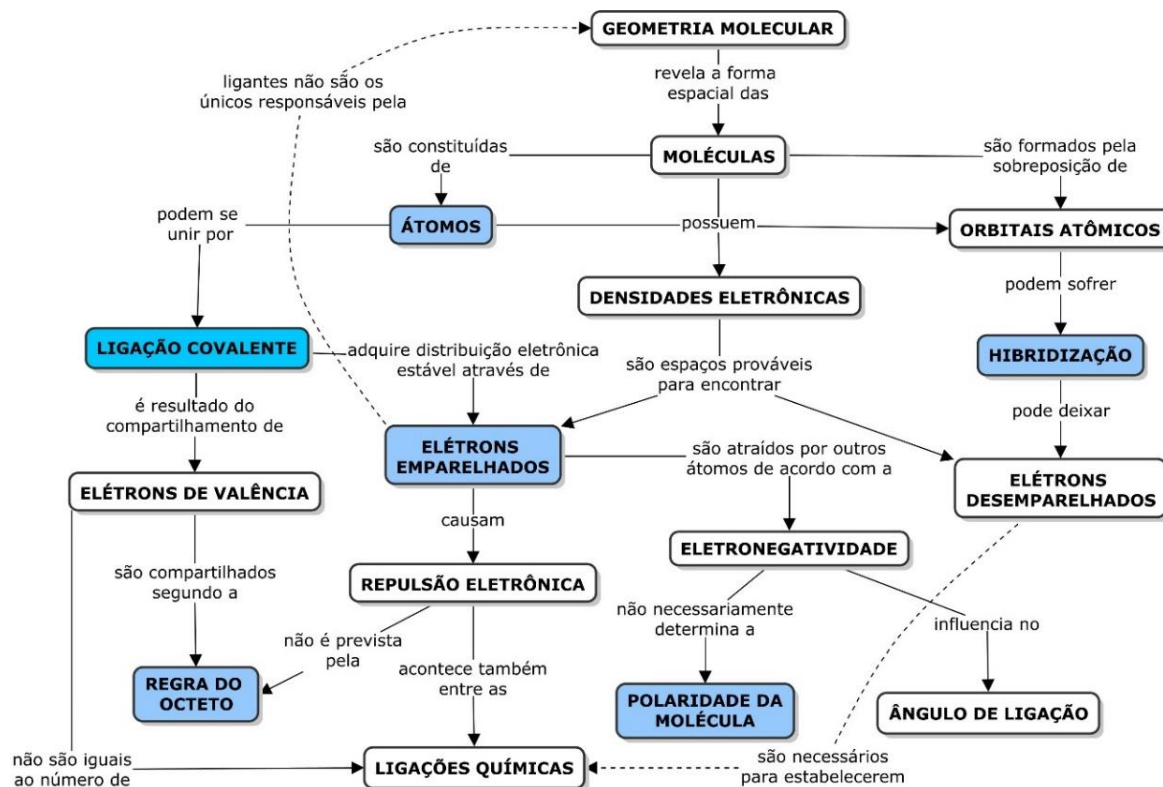
A preocupação do docente em relação ao aspecto espacial indica que os estudantes estão desenvolvendo concepções incorretas associadas às múltiplas representações. Isso revela dificuldades em visualizar e mentalmente manipular representações moleculares. Portanto, é essencial trabalhar o desenvolvimento de habilidades espaciais (Barnea, 2000; Martina, 2017) para permitir que os alunos compreendam os conceitos químicos em níveis submicroscópico, macroscópico e simbólico (Johnstone, 1991).

Nesse contexto, o docente ressaltou a importância de estratégias didáticas que possam superar o desafio da visualização na química. Em consonância com os exemplos de estratégias didáticas apresentados na revisão teórica (Bouson, 2015; Fabri, 2016; Santos, 2019; Silva; Fonseca, 2021), propomos ampliar a diversidade de abordagens em sala de aula, incorporando métodos criativos para facilitar a compreensão, abrangendo diversas formas de representação molecular, incluindo abordagens em 2D e 3D.

### 2.2.5.2 Docente B

Ao observar de forma abrangente os conceitos abordados pela docente B (Figura 7), é possível notar uma ênfase maior no lado esquerdo do mapa conceitual. Em uma progressão ascendente, os conceitos que receberam mais tempo de discussão foram: átomos (1-2 min.), regra do octeto, polaridade, hibridização (2-3 min.), elétrons emparelhados (4-5 min.), ligação covalente (5-6 min.). De modo geral, foram mencionados seis conceitos distintos durante o período de 25 minutos.

Figura 7 – Conceitos abordados pela docente B realçados em azul. Destaque para o conceito considerado essencial para a compreensão da noção de geometria molecular.



Fonte: Os autores.

No início da entrevista, a docente avaliou o conceito de “átomos” e recomendou a inclusão de conceitos como ligação iônica e metálica, mesmo que de forma superficial. Essa adaptação ajuda a prevenir interpretações incorretas de que os átomos estão unidos apenas por ligações covalentes.

O conceito de “regra do octeto” foi mencionado para suscitar uma indagação sobre as implicações de seu uso e sua relação com o conceito de estabilidade. A perspectiva da entrevistada coincide com a visão de Subramanian, Filho e Saldanha (1989, p. 290), que afirmam que “os alunos devem ser orientados a compreender claramente o princípio subjacente à regra dos gases nobres”. Assim, a ênfase na regra do octeto pode acarretar efeitos negativos se as exceções não forem abordadas com destaque.

Embora as discussões sobre os impactos negativos do uso inadequado da regra do octeto sejam relativamente antigas, muitos livros didáticos enfatizam os cenários onde a regra é aplicável, enquanto os casos que não se encaixam na regra são abordados de maneira superficial. Uma forma de reduzir o risco de desenvolver concepções errôneas a partir da leitura do mapa conceitual é ajustá-lo conforme a sugestão anterior do docente A, ou seja, adicionando proposições com conceitos que expliquem a contração e expansão da regra.

O conceito “ligação covalente” foi abordado em dois momentos durante a entrevista. O termo que conecta “ligação covalente” a “elétrons emparelhados” causou incertezas, resultando na alocação de alguns minutos da entrevista para buscar um termo de ligação mais coerente. Com o intuito de aprimorar a clareza da proposição, foi sugerido substituir o termo de ligação “adquire distribuição eletrônica estável através de” por “resulta de uma distribuição estável por meio de”.

A docente analisou o conceito “densidades eletrônicas” para avaliar e aprovar as duas proposições associadas a ele. Portanto, não houve sugestão de alterações. O próximo conceito abordado foi “elétrons emparelhados”, e o termo de ligação “ligantes não são os únicos responsáveis pela” foi questionado. Foi sugerido rever essa proposição para maior clareza, possivelmente eliminando-a, mas reforçando a importância de adotar estratégias didáticas que evitem a percepção equivocada de que a geometria angular de moléculas como H<sub>2</sub>O é resultante apenas da repulsão entre os pares de elétrons não ligantes. A literatura internacional previamente documentou esse tipo de erro. Peterson, Treagust e Garnett (1986) e Birk e Kurtz (1999) identificaram equívocos por parte dos estudantes que envolve a consideração exclusiva dos pares de elétrons ligantes – ou não ligantes – na determinação da configuração espacial da

molécula, negligenciando o impacto de todos os pares de elétrons – ligantes e não ligantes – no arranjo final.

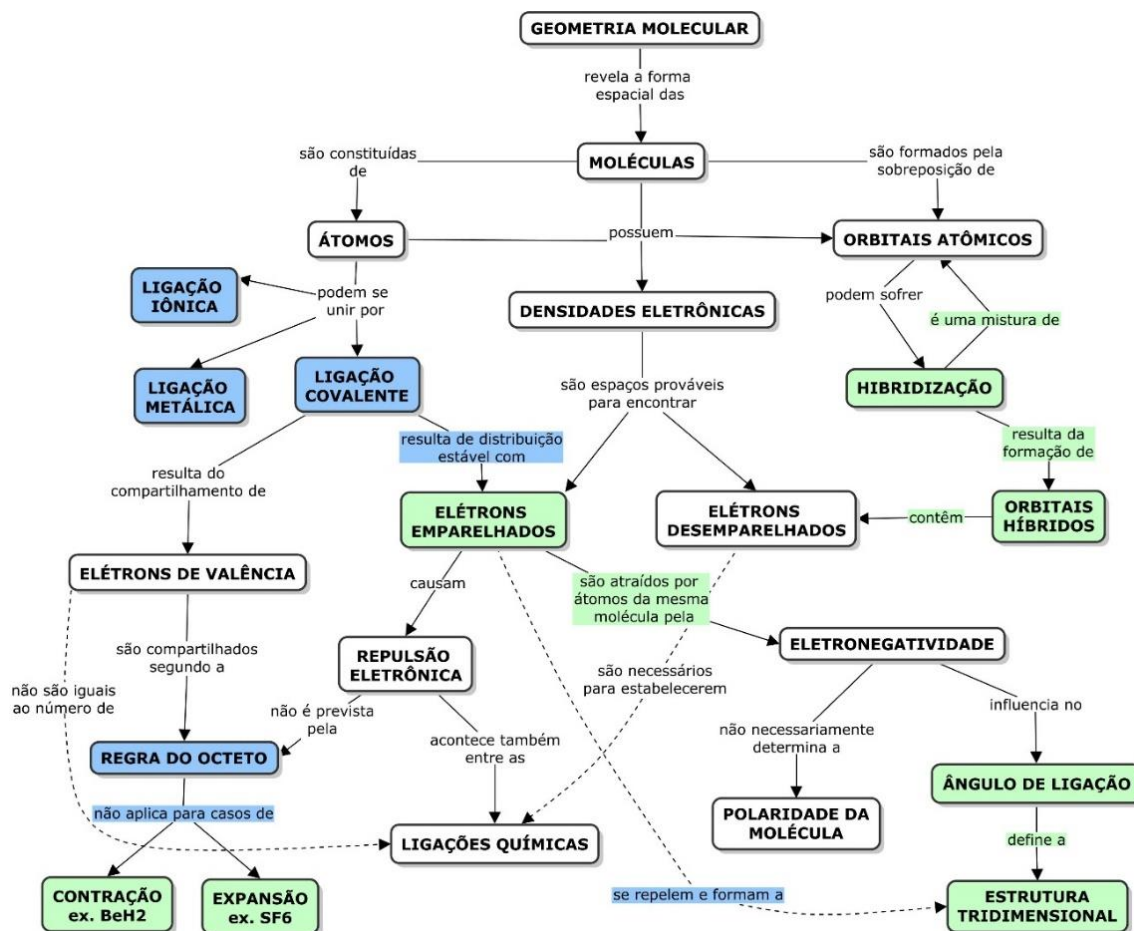
Quando questionada sobre os conceitos-chave, a docente novamente mencionou o conceito de “ligação covalente”, desta vez para justificar que a compreensão da geometria molecular depende das noções de ligações químicas. Além disso, ao abordar o conceito de “polaridade”, a docente enfatizou que os estudantes devem ser incentivados a ver os modelos e conceitos científicos como construtos que ampliam o entendimento dos fenômenos ao nosso redor. No entanto, conceitos como polaridade e ligações intermoleculares têm levado a erros conceituais, indicando a persistência de desafios na compreensão da relação entre a estrutura molecular e as propriedades das substâncias (Baldock; Blanchard; Fernandez, 2021).

Quanto ao conceito mais desafiador para a aprendizagem, a docente destacou a “hibridização”. No contexto do Ensino Médio, é comum que a Teoria da Ligação de Valência (TLV) seja abordada de forma superficial para explicar a hibridização, o que pode resultar em dificuldades de compreensão de conceitos complexos e abstratos. Se a hibridização já é de difícil entendimento no Ensino Superior (Ramos et al., 2008), não surpreende que essa dificuldade seja ainda mais pronunciada no Ensino Médio.

#### 2.2.5.3 O mapa conceitual colaborativo

As diversas perspectivas dos docentes entrevistados tiveram um papel fundamental na revisão do mapa conceitual. Nessa abordagem, buscamos destacar como um mapa conceitual foi construído de forma colaborativa (Figura 8) utilizando uma metodologia inovadora (Aguar; Correia, 2019), que transformou as experiências compartilhadas em um recurso educacional amplamente aceito. Após incorporar as sugestões dos entrevistados, o mapa conceitual final passou por ajustes estruturais para melhorar sua fluidez na leitura. Como pode ser observado, cada docente contribuiu com informações adicionais para diferentes conceitos, exceto o conceito de “regra do octeto”, que foi abordado por ambos os docentes.

Figura 8 – Mapa conceitual construído colaborativamente – Conceitos realçados de acordo com as sugestões dos docentes A (verde) e B (azul)



Fonte: Os autores.

As perspectivas dos docentes exemplificam como a disposição de ideias está ligada à prática profissional, sendo influenciada pelo contexto e experiências individuais. Embora ocupem posições similares - ambos são professores de química na USP - suas experiências levaram a considerações distintas, porém complementares. Por exemplo, enquanto o docente A explorou questões de espacialidade e aprendizagem de conceitos complexos, a docente B concentrou-se mais em conceitos fundamentais.

Das entrevistas emerge o desafio de ensinar geometria molecular, envolvendo a elaboração e aplicação de estratégias didáticas que unam objetivos de aprendizado relacionados à estrutura molecular e o desenvolvimento de habilidades espaciais. Um obstáculo a superar é a clara ligação entre a estrutura e as propriedades das substâncias, já que o uso de modelos moleculares físicos ou virtuais nem sempre resulta em uma aprendizagem significativa. Portanto, é crucial uma abordagem que possibilite a aquisição de conhecimentos conceituais e procedimentais, sem perder de vista a motivação para estudar e aplicar tais conhecimentos.

Enquanto as pesquisas com estudantes fornecem evidências sobre suas dificuldades de aprendizado de conceitos científicos e sua interação com os recursos didáticos, as percepções dos docentes oferecem uma visão abrangente de todos os aspectos do aprendizado do conteúdo. Dessa forma, os docentes compartilham suas preocupações com base em suas experiências em sala de aula, ressaltando conceitos cruciais para superar os desafios inerentes ao processo educacional.

### **2.2.6 Considerações finais**

A análise e discussão consideraram as visões dos entrevistados em conexão com o conhecimento teórico especializado. As entrevistas permitiram abordar o ensino de geometria molecular a partir de uma nova perspectiva. As contribuições dos docentes deram origem a quatro linhas de discussão sobre a aprendizagem desse tema. O docente A enfocou o desenvolvimento de habilidades espaciais para lidar com múltiplas representações, além de enfatizar a necessidade de estratégias didáticas que promovam a visualização de moléculas tridimensionais. A docente B destacou a importância de relacionar os conceitos apresentados com fenômenos observáveis, enfatizando a inseparabilidade entre estrutura e propriedade das substâncias. Ela também ressaltou a importância de abordar os conhecimentos químicos de forma a superar erros conceituais que possam surgir durante o processo educativo.

A pluralidade de perspectivas auxilia na construção e adequação de diferentes contextos de aprendizagem. Os resultados deste estudo confirmam a necessidade de se considerar não somente as expectativas e dificuldades dos estudantes. Os docentes, a partir de suas experiências, podem revelar cenários mais adequados para a aprendizagem dos estudantes. Assim, o mapa conceitual colaborativo (Figura 8) pode ser utilizado como instrumento norteador das práticas educativas relacionadas ao ensino de geometria molecular. Ele sumariza os principais conceitos que devem ser considerados no âmbito do ensino, do ponto de vista de docentes experientes.

Em resumo, a utilização de entrevistas com mapas conceituais permite acessar a perspectiva dos sujeitos de pesquisa sobre aspectos relevantes do processo em análise. Em nosso caso específico, esses sujeitos podem ser gestores, professores ou alunos, e o processo em análise é o ensino de geometria molecular, mas o método poderia ser aplicado a diferentes contextos educacionais, abrangendo temas como ensino, aprendizagem, engajamento, avaliação e conteúdos de diversas disciplinas.

## 2.3 ABORDAGEM NEUROCOGNITIVA DE PROCESSOS ATENCIONAIS ENVOLVIDOS NA APRENDIZAGEM MEDIADA POR MAPAS CONCEITUAIS<sup>4</sup>

O engajamento atencional do aluno durante a aprendizagem parece ser o principal objetivo a ser alcançado quando se está elaborando um material instrucional. O mapeamento conceitual tem sido difundido com uma técnica promissora para a aquisição e representação de ideias, revelando-se como uma alternativa pedagógica útil no cotidiano escolar.

O objetivo deste trabalho é apresentar subsídios teóricos nos campos da neurociência cognitiva, psicologia cognitiva e educação para justificar, a partir do funcionamento cerebral da atenção, estratégias pedagógicas que exploram o uso de mapas conceituais. Um quadro de referência foi produzido com indicações de mapas conceituais que levam em consideração o fator “atenção” no processo de aprendizagem, como o mapa com erros, com lacunas, com figuras e com cores/contrastes.

Baseada nas noções de mecanismos atencionais e processamento da informação da Teoria da Carga Cognitiva, uma proposta de construção de mapas conceituais foi apresentada para exemplificar a aplicação da literatura discutida.

### 2.3.1 Introdução

Estratégias de ensino têm ganhado cada vez mais possibilidades de intervenção em sala de aula para alcançar objetivos de aprendizagem específicos (Hattie; Donoghue, 2016). Como resultado, uma variedade de métodos surge a todo instante na tentativa de minimizar dificuldades de aprendizagem associadas, principalmente, à natureza do conteúdo. No Brasil, muito se discute sobre a necessidade de práticas pedagógicas visando à aprendizagem significativa, tendo em vista a possibilidade de tomar os conhecimentos prévios dos alunos como ponto de partida para a construção de novos conhecimentos.

A ideia da aprendizagem significativa repousa na possibilidade da integração de conhecimentos novos a uma estrutura cognitiva do sujeito já consolidada ou em consolidação, de onde surgem novas compreensões e, conseqüentemente, aprimoramento de concepções

---

<sup>4</sup> O conteúdo desta seção secundária foi publicado em periódico científico com antecedência. Utilize a referência a seguir para citar alguma passagem específica desta seção: SILVA, K. S.; FONSECA, L. S.; CORREIA, P. R. M. Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 13, n. 2, p. 247-268, 2020. DOI [10.3895/rbect.v13n2.9421](https://doi.org/10.3895/rbect.v13n2.9421)

(Ausubel, 2000). Não é uma aprendizagem permanente no sentido literal, mas plástica, contextual, podendo ser modificada ao longo do tempo ou esquecida.

Embora a questão do conhecimento prévio venha sendo tratada como o fator principal a se considerar durante a elaboração de estratégias pedagógicas, o entendimento do funcionamento cerebral de funções cognitivas como a “atenção” pode abrir portas para a elaboração de estratégias mais eficazes, uma vez que o potencial de produção de aprendizagem do aluno depende da sua atenção e do seu engajamento cognitivo.

Enquanto ferramenta pedagógica, o Mapa Conceitual (MC) tem sido importante tanto para fins de pesquisa, quanto para a aprendizagem rotineira em sala de aula (Zarpelon; Resende; Pinheiro, 2015). Se construído pelo próprio aluno, o MC tende a revelar a organização hierárquica dos conceitos aprendidos e suas relações. Esse é o tipo de MC mais incentivado na escola, mas não tem sido o mais satisfatório para alguns contextos devido ao tempo investido na sua produção, avaliação e devolutiva (Correia; Aguiar, 2016). Além disso, a falta de treinamento dos estudantes pode levar à construção de MCs inapropriados.

Por outro lado, se o MC é concebido pelo professor, espera-se que o aprendiz reflita sobre as suas ideias segundo uma estrutura espacial e hierárquica pré-definida. Esse tipo de MC traz vantagens quanto à necessidade de treinamento somente pelo professor; à maior possibilidade de clareza e precisão hierárquica dos conceitos; à familiarização pelos aprendizes de um MC adequado; à diversidade de avaliações de desempenho que podem ser empregadas; ao tempo ganho para investimento em outras tarefas (Correia; Cabral; Aguiar, 2016).

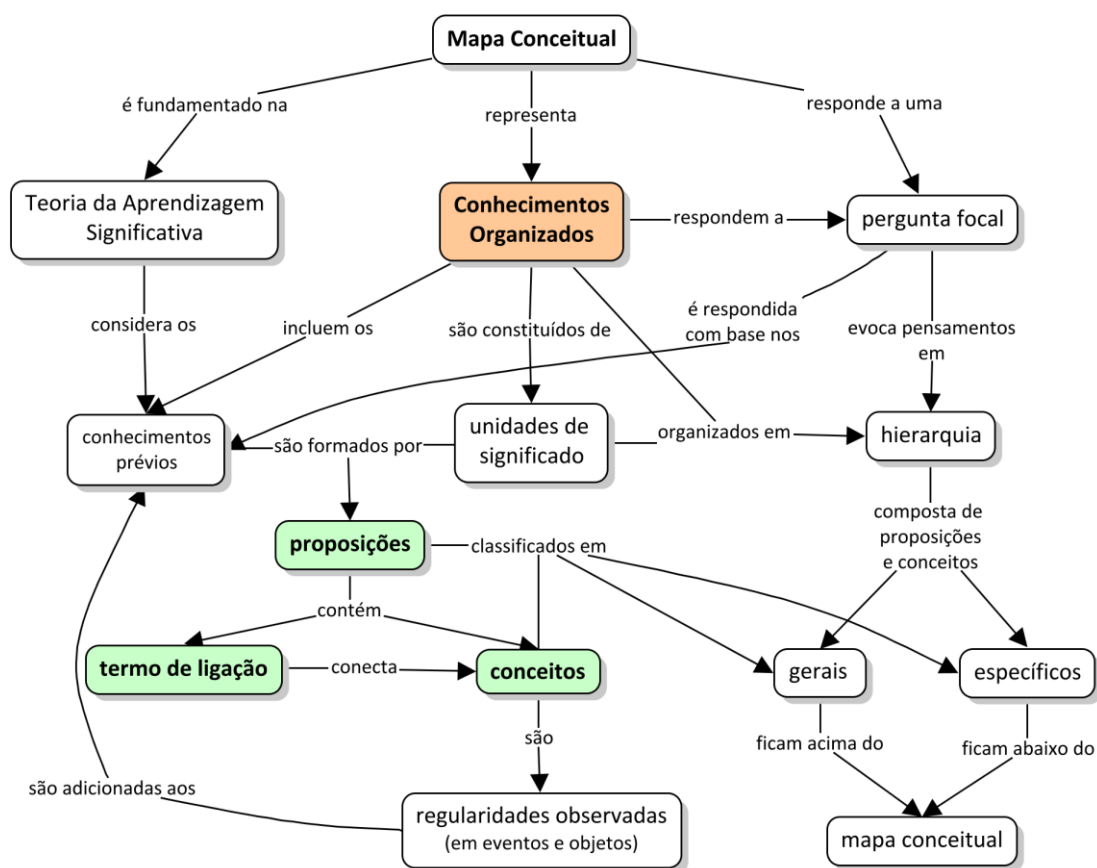
Quais seriam, portanto, as possibilidades de representação visuoespacial de um determinado conteúdo por meio de um MC manipulado pelo professor? Para responder a essa pergunta, recorreu-se às noções de mapas conceituais apresentadas por Novak (2010) e a princípios oriundos da psicologia cognitiva e neurociência cognitiva que colocam a “atenção” como principal função cognitiva associada à aprendizagem.

Inicialmente, apresentamos a noção de mapeamento conceitual e suas aplicações, destacando elementos importantes que abrem espaço para a discussão sobre processos atencionais. Após a abordagem de conceitos subjacentes a tais processos, discutimos o papel da atenção na aprendizagem por meio de MCs, levando em consideração que os benefícios dessa ferramenta dependem do foco dispensado pelo estudante nos processos cognitivos desencadeados a partir dos estímulos visuais presentes nos MCs. Por fim, introduzimos conceitos da Teoria da Carga Cognitiva – TCC (Sweller, 2011) para informar alguns procedimentos instrucionais que o professor deve considerar ao trabalhar com MCs.

### 2.3.2 Noções e aplicações do mapa conceitual

A técnica de mapeamento conceitual concebida na década de 1970 por Novak e colaboradores serviu, a priori, como um instrumento de pesquisa para compreender as concepções de crianças sobre determinados tópicos de ciências (Novak, 2010). A Figura 9 apresenta um MC, que é um organizador gráfico que representa as relações entre os conceitos envolvidos numa estrutura de conhecimento, geralmente evocada a partir de uma pergunta focal. É importante destacar que todo conhecimento é construído a partir de conceitos e proposições, pois não se pode validar ou invalidar fatos isolados sem uma estrutura linguística convencionada. Nesse sentido, as proposições formam unidades de significados e são combinações de dois ou mais conceitos que afirmam sobre o tema representado (Novak, 2010).

Figura 9 – Mapa conceitual que responde à pergunta focal “Quais são os principais elementos de um MC e suas relações?”



Fonte: Os autores.

Atualmente, os MCs têm auxiliado estudantes e educadores a buscarem a aprendizagem significativa. Com efeito, a base teórica que subsidia os estudos de Novak é a Teoria da Aprendizagem Significativa (Ausubel, 2000), ao considerar que:

- A aprendizagem significativa – em contraste à aprendizagem mecânica – é necessária para a conceitualização;
- A nova aprendizagem deve se ancorar em conceitos e proposições já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz;
- O aluno deve ser incentivado a optar pela aprendizagem significativa;
- Materiais concretos adequados são necessários para aprender conceitos abstratos, juntamente, com instruções didáticas apropriadas;
- A aprendizagem é altamente idiossincrática e progride com o tempo;
- A aprendizagem significativa de alta qualidade leva à construção de estruturas conceituais e proposicionais bem integradas que facilitam a nova aprendizagem e a resolução criativa de problemas. (Cañas; Novak, 2006, p. 2).

Dada a característica criativa da produção de MCs, não há um modelo correto ou perfeito, na verdade, existem alguns elementos essenciais para a exposição de ideias segundo um raciocínio coerente. Novak (2010) explica que o mapeamento conceitual tende a se desenrolar hierarquicamente, com os conceitos mais gerais e inclusivos no topo do mapa e os mais específicos e menos inclusivos para baixo. Os novos conceitos a serem incorporados em uma estrutura cognitiva são retidos com mais robustez quando o sujeito já tem conhecimentos prévios, sendo mais fácil partir do geral e ir para os seus detalhes (diferenciação progressiva), do que partir de vários detalhes para determinar o conceito geral (reconciliação integrativa) (Ausubel, 2000).

Os MCs têm sido utilizado, principalmente, para melhorar a aprendizagem do aluno que o produz em sala de aula (Zarpelon; Resende; Pinheiro, 2015); como instrumento de avaliação formativa ou de pesquisa científica (Dantas; Silva; Borges, 2018). Frequentemente, alguns materiais instrucionais trazem uma síntese em forma de MC do que foi ou será abordado no material. Porém, o que se tem visto é uma disseminação da ideia de aprender ou sintetizar conteúdos através de mapas conceituais sem considerar fundamentos oriundos de pesquisas da área (Cañas; Novak, 2006).

A falta de treinamento na técnica de mapeamento conceitual se apresenta como um problema. Novak, Cañas e Reiska (2015) argumentam que a clareza de um MC depende do seu conteúdo e da sua estrutura gráfica. Para tentar minimizar o efeito desconcertante do uso de mapeamento conceitual sem o devido cuidado, Aguiar e Correia (2013) discutiram alguns parâmetros de referência para a construção adequada de MCs com base na necessidade de estabelecimento de clareza semântica das proposições, pergunta focal, organização hierárquica dos conceitos e revisões contínuas. Em outro momento, Aguiar e Correia (2017) propuseram

uma sequência de treinamentos que vai da representação do conhecimento (escolha dos conceitos e sua organização hierárquica) a sua modelagem (estabelecimento de proposições válidas e relações entre os conceitos).

E quanto à avaliação dos MCs? Notadamente, a diversidade de representação dos organizadores gráficos chama a atenção dos educadores que precisam encontrar estratégias de avaliação. Dessa forma, a estrutura (organização gráfica) e conteúdo (conjunto de proposições) são os principais indicadores de qualidade de um MC. Ao sugerirem critérios para a avaliação qualitativa de MCs, Novak, Cañas e Reiska (2015) enfatizam que um MC hierarquicamente estruturado pressupõe uma estrutura cognitiva organizada (Ausubel, 2000). Relativamente ao conteúdo, os autores reforçam a importância da relevância dos conceitos, da qualidade dos termos de ligação e da validade das proposições.

Embora uma acentuada preocupação se volte à qualidade estrutural e conceitual do MC, poucas pesquisas (Balley, 2005; Santos *et al.*, 2016) têm direcionado o foco para questões mais específicas que levem em consideração o funcionamento cerebral da aprendizagem e sua relação com as estratégias pedagógicas que sugerem o uso de MCs. Os pressupostos teóricos da Teoria da Aprendizagem Significativa embasam o funcionamento da aprendizagem em seus desdobramentos cognitivos e apontam as relações da aquisição e retenção de novos conhecimentos com os materiais instrucionais, mas não esclarecem – do ponto de vista neurocognitivo – o funcionamento da memória e as variáveis pelas quais as informações externas são interpretadas pelo sujeito, como cor, forma, via de entrada (auditiva, olfativa, gustativa, visual, tátil).

A especificação das relações entre os materiais instrucionais e o funcionamento cognitivo tem sido cada vez mais necessária, uma vez que pesquisas educacionais vêm revelando as variações no desempenho da aprendizagem quando se opta por uma ou outra abordagem metodológica e, também, por uma ou outra ferramenta pedagógica.

### **2.3.3 Processos atencionais**

A atenção é um dos pilares da aprendizagem, pois sem ela a facilitação da passagem das informações ao longo das sinapses com a finalidade de formar memórias duradouras não seria possível (Cosenza; Guerra, 2011). Segundo Gazzaniga e colaboradores (2006, p. 265), “a atenção é um mecanismo cerebral cognitivo que possibilita alguém processar informações, pensamentos ou ações relevantes, enquanto ignora outros irrelevantes ou dispersivos”.

Resultados de pesquisas em psicologia sobre a atenção levaram cientistas a classificá-la basicamente em atenção voluntária e automática (Lent, 2010). A utilização de métodos de eletroencefalografia e neuroimagem tem reforçado o envolvimento de estruturas cerebrais específicas para a atenção voluntária – focalização de estímulos de forma consciente – e para a atenção reflexa, quando a orientação é reflexa para novos estímulos no ambiente, como som, luz, movimento, contraste.

Fiori (2008) ressalta que, em 1994, os psicólogos Posner e Raichle identificaram uma série de operações mentais relacionadas ao ato de prestar atenção a eventos visuoespaciais: a captação da atenção por um estímulo (processo automático) eleva o estado de alerta do sujeito; há um processo de localização espacial e focalização do alvo; há um desengajamento atencional da região espacial como consequência da criação de expectativa de um novo alvo e uma nova localização; há uma busca pela nova localização e focalização do novo alvo (processo controlado).

A especialização de sistemas atencionais para processos automáticos e controlados sugere que algumas áreas do cérebro são responsáveis pela seletividade e manutenção (controle) da atenção. Esse tipo de esclarecimento é importante porque o processamento da atenção decorre dos estímulos recebidos pelos órgãos sensoriais e seu controle é dependente do que já existe na memória do indivíduo (Gazzaniga *et al.*, 2006).

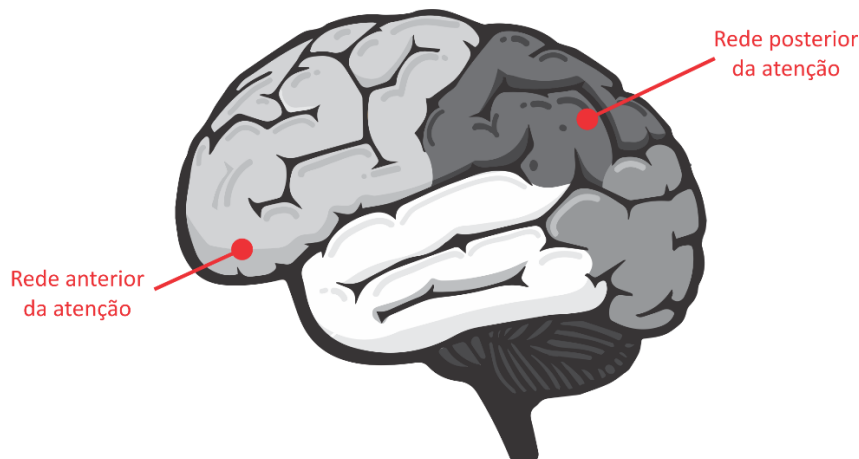
São discutidos dois tipos de atenção. A atenção seletiva se refere aos mecanismos cerebrais incumbidos de selecionar as informações mais importantes e ignorar os estímulos distraidores (Gazzaniga *et al.*, 2006). Esse fenômeno é facilmente percebido quando alguém que está predeterminado (ação voluntária) a localizar um determinado alvo sensibiliza a sua atenção para as características do objeto e o encontra rapidamente mesmo em meio ao “caos”.

A atenção concentrada é a que parece mais preocupar os educadores, pois é demandada, sobretudo, durante a aprendizagem. Nesse contexto, há uma intensificação das atividades neuronais responsáveis pela percepção e compreensão dos sistemas de linguagem, uma vez que há uma maior sensibilização da rede anterior da atenção para atividades de compreensão de palavras (Matlin, 2004). Dessa forma, a atenção concentrada está em ação quando há a focalização do alvo e a tentativa de decodificação dos seus significados.

A Figura 10 mostra as duas principais áreas cerebrais – rede posterior e anterior – que regulam os mecanismos atencionais segundo o modelo de Posner e Raichle. A rede posterior da atenção compreende o córtex parietal e está envolvido em atividades de orientação espacial. É a área cortical mais ativada quando se está em busca de um alvo visual. Já a rede anterior da

atenção que envolve parte do lobo frontal responde à focalização da atenção em símbolos linguísticos, como as palavras. É nessa mesma área que os neurônios especializados em inibir respostas automáticas a estímulos são sensibilizados (Posner; Petersen, 1990).

Figura 10 – Principais áreas envolvidas no processamento da atenção



Fonte: Os autores. Adaptado de iconicbestiary/Freepik.

Genericamente, pode-se dizer que a operacionalização da atenção se dá segundo dois processos: *bottom-up*, que decorre da percepção de estímulos sensoriais que acabam por guiar a focalização do alvo, e *top-down*, cujo processamento da informação não depende exclusivamente da percepção dos estímulos sensoriais, mas sim da expectativa criada previamente e responsável por dirigir o foco da atenção (Stevens; Bavelier, 2011). O processamento *bottom-up* é guiado pelo estímulo. Ou seja, o estímulo influencia a nossa percepção, direcionando a nossa consciência cognitiva para o objeto. Em contraste, o processamento *top-down* usa os conhecimentos prévios e as expectativas para influenciar a nossa percepção. Nesse caso, as expectativas baseadas no que o sujeito já conhece moldam a percepção daquilo que é alvo da atenção.

De forma simplificada, um elemento de contraste presente em um MC pode direcionar o foco da atenção do leitor de forma automática, partindo da percepção do estímulo visual e alcançando processos cognitivos associados ao conteúdo observado (processamento *bottom-up*). Por outro lado, se considerarmos que um aluno observa um MC a partir da sua pergunta focal, processos cognitivos relativos aos conhecimentos prévios do aluno podem entrar em ação antes mesmo de o foco ser dirigido para o MC. Cria-se, nesse caso, uma expectativa e o foco é direcionado em função do objetivo do leitor (processamento *top-down*), que seria o de encontrar estímulos visuais que levem a uma resposta. Portanto, cabe o questionamento sobre como os

princípios do funcionamento da atenção podem contribuir para o delineamento de estratégias pedagógicas envolvendo o MC.

#### **2.3.4 Relação entre a aprendizagem por mapas conceituais e os processos atencionais**

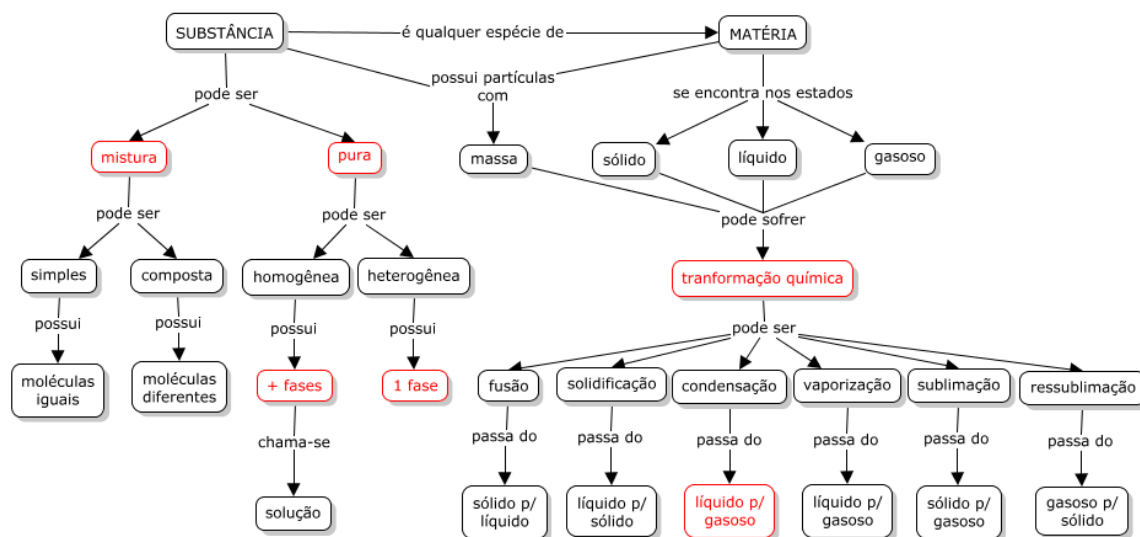
Os MCs enquanto organizadores gráficos requisitam um alto grau de alerta atencional para que a mensagem seja processada no cérebro do leitor. Em linhas gerais, a ideia de funcionamento do MC é compatível com os modelos de processamento das informações aludidos pelas pesquisas em neurociência cognitiva e psicologia cognitiva (Santos *et al.*, 2016).

Os efeitos da produção de MC pelo aluno podem ser positivos, mas a construção de bons mapas por iniciantes é uma tarefa difícil e geralmente causa sobrecarga cognitiva (Acuna; Aymes; Lopez Medrano, 2014). Dessa forma, o modelo de MC tratado neste tópico é aquele criado pelo educador e disponibilizado ao aluno para mobilizar a aprendizagem inicial de um conteúdo, além de servir para organizar e avaliar o conhecimento previamente estudado. Segundo Correia, Cabral e Aguiar (2016), o uso do MC com essa finalidade traz vantagens em relação ao criado pelo próprio aluno porque enquanto o professor se preocupa em aprender a técnica de mapeamento, os alunos precisam somente ler o mapa e dedicar seus recursos cognitivos ao tema estudado.

##### **2.3.4.1 Mapa com erros**

O MC com erros (Figura 11) é uma importante ferramenta para analisar a capacidade dos estudantes em localizar relações conceituais inapropriadas (Correia; Cabral; Aguiar, 2016). Trata-se de um mapa criado pelo professor e estruturado visando à validação de proposições dentro de uma rede integrada de conceitos. Considerando as limitações da atenção, sobre esse tipo de mapa é relevante considerar: a qualidade e relevância dos erros conceituais; a quantidade de erros conceituais a serem incorporados; suas posições espaciais.

Figura 11 – Exemplo da aplicação de erros em MC sobre propriedades da matéria. As marcações em vermelho mostram os erros que deverão ser encontrados e corrigidos pelos alunos, que recebem mapas em preto e branco.



Fonte: Os autores.

Depois de concebido um mapa satisfatório em conteúdo e estrutura, sugere-se pensar estrategicamente na incorporação dos erros conceituais de modo a incentivar a leitura integral do conteúdo. Vale salientar o cuidado que deve ser empregado na escolha e quantidade das proposições a serem evocadas, pois o emprego da atenção espacial associada à busca visual ao longo da estrutura do mapa, a atenção para os significados da linguagem verbal e a manutenção das informações pertinentes na memória de trabalho são atividades que requerem muito esforço das funções executivas, podendo levar a uma sobrecarga cognitiva (Sweller, 2011).

O MC com erro parece funcionar como um detector de incoerências nos padrões de conhecimentos previamente estabelecidos em experiências cotidianas e escolares. Em tese publicada em 2011, Brockington (2011) mostrou que as respostas emocionais diante de interpretações de conceitos científicos dependem do nível de conhecimento do sujeito. Professores e alunos, por exemplo, reagem diferentemente durante a interpretação de conceitos científicos e alternativos. Ademais, o fator emocional é preponderantemente necessário para regular o nível de motivação e, conseqüentemente, de atenção durante a resolução de problemas.

Em mapeamento de regiões cerebrais ativadas durante a escuta de frases semanticamente e sintaticamente incongruentes, Friederici e colegas (2003) identificaram respostas cerebrais mais ativas nos lobos frontal e temporal. Uma série de experimentos permitiu sugerir que existem processos automáticos de compreensão da linguagem, de modo que quando o sujeito é surpreendido com frases semanticamente incorretas, como “o gato come

cenoura”, ou sintaticamente incorretas, como “o gato leite toma”, ondas do potencial evocado são instantaneamente geradas, indicando que diferentes partes do cérebro se interconectam formando uma espécie de léxico mental (Fiori, 2008).

De modo análogo, esses fatos sugerem que diante de proposições incorretas, o aluno reage emocionalmente em função dos seus conhecimentos prévios, que, por seu turno, influenciam diretamente o engajamento atencional. O princípio #8 – ou *PEN #8*, de *Psychology, Education, Neuroscience* – organizado pelo Centro de Pesquisa em Ciências da Aprendizagem da Austrália<sup>5</sup> traz evidências científicas de que o erro pode ser considerado uma falha produtiva (Kapur, 2016).

Um aluno de alto desempenho ativa circuitos neurais ligados à atenção e memória, sugerindo que esse tipo de aluno se engaja em processos produtivos na procura de erros e soluções, enquanto o aluno de baixo desempenho ativa primordialmente circuitos de recompensa, buscando feedback positivo (Downar; Bhatt; Montague, 2011).

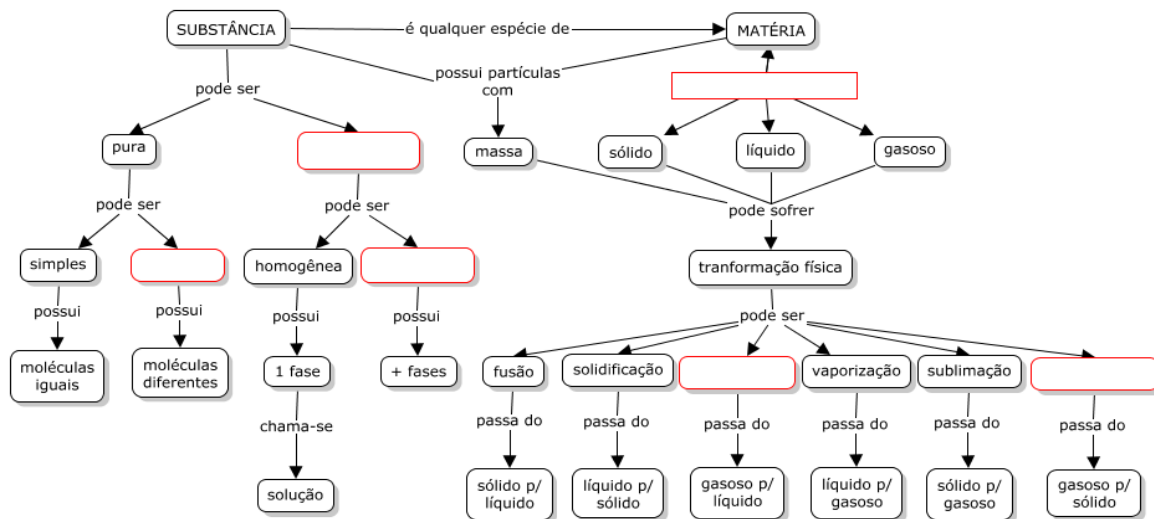
#### 2.3.4.2 Mapa com lacunas

Uma estratégia voltada à captação da atenção para aspectos específicos do conteúdo pode ser a inclusão de lacunas para ser preenchidas, tanto no lugar de termos de ligação, quanto de conceitos (Figura 12). Ao ler um MC comum, o aluno pode prestar atenção nos conceitos e rapidamente supor uma ligação entre eles, como uma concepção do senso comum, sem necessariamente focar nos termos de ligação.

---

<sup>5</sup> *PEN Principle #8 – Embrace error to improve learning*. Disponível em: <https://www.slrc.org.au/pen-principle-8-embrace-error-improve-learning/>.

Figura 12 – Exemplo da aplicação de lacunas em MC sobre propriedades da matéria. As marcações em vermelho mostram as lacunas que deverão ser preenchidas pelos alunos.



Fonte: Os autores.

A adição de lacunas nos termos de ligação, seguida de feedback, poderia minimizar esse efeito. Essa indicação condiz com os resultados que Bisra (2007) apontou quando verificou através da técnica de rastreamento ocular (*eye-tracking*) que o leitor de MCs nem sempre fixa sua atenção nos termos de ligação, mas preponderantemente nos conceitos, revelando ser este um primeiro passo para conferir sentido aos MCs.

Outro fundamento para a indicação de MCs com lacunas tem relação com o princípio da pré-ativação de estratégias para guiar a aprendizagem (Princípio #12, Centro de Pesquisa em Ciências da Aprendizagem da Austrália<sup>6</sup>), que consiste em estabelecer um quadro de conceitos para organizar o conteúdo aprendido ou a ser aprendido, de preferência, por meio da recordação ativa dos conhecimentos (Verdi *et al*, 1997). Nesse viés, na procura por respostas, o cérebro ativa previamente padrões de estímulo-resposta e processa as informações futuras com mais facilidade (Schacter; Buckner, 1998).

### 2.3.4.3 Mapa com figuras/ícones

Estudos psicológicos e neurocientíficos (Kandel *et al.*, 2014) comprovaram a existência de mecanismos cerebrais específicos relativos à memória explícita – que é evocada

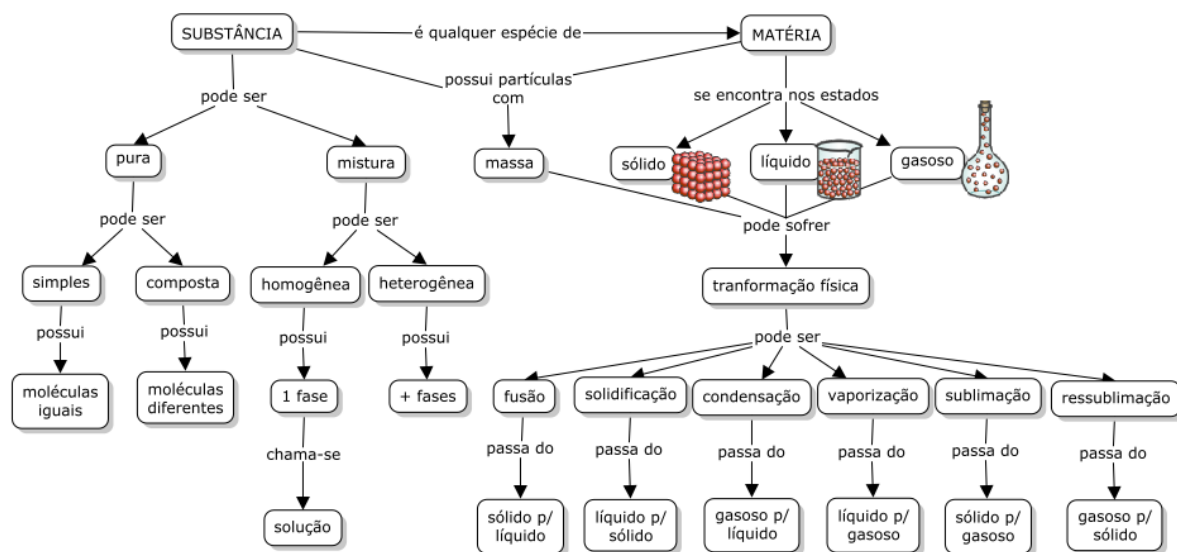
<sup>6</sup> PEN Principle #12 – Pre-activate strategies to guide learning. Disponível em: <https://www.slrc.org.au/pen-principal-12/>.

conscientemente –, levando a identificação de dois subtipos dessa memória: a episódica e a semântica.

A memória episódica é basicamente a memória das experiências, eventos autobiográficos, série de fatos e cargas emocionais geradas nesses momentos. Já a memória semântica se refere a registros mais estruturados, de significado de símbolos verbais, de conceitos. Em geral, a memória semântica deriva da episódica, existe uma dialética entre elas, pois as experiências cotidianas vêm na maioria dos casos carregadas de significados (Kandel *et al.*, 2014).

A breve abordagem acerca da memória episódica e semântica abre espaço para a introdução de uma proposta que envolve o uso de figuras em MCs (Figura 13) com o objetivo de chamar a atenção do leitor para eventos específicos e potencialmente significativos. Nessa categoria de MCs, entra em jogo o papel do sistema de processamento da informação conhecido como duplo canal, que inclui os processamentos visual-pictórico e auditivo-verbal amplamente discutidos pela Teoria da Aprendizagem Multimídia (Mayer, 2014).

Figura 13 – Exemplo da aplicação de figuras/ícones em MC sobre propriedades da matéria. Os ícones mostram as possíveis disposições espaciais que deverão ser identificadas e associadas ao conteúdo.



Fonte: Os autores.

Nessa perspectiva, materiais instrucionais que privilegiam imagens e textos/áudio são mais facilmente compreendidos e produzem memórias mais robustas (Johnson; Zatorre, 2006). O fato de o cérebro interpretar os dois tipos de informação simultaneamente consiste na distinção de regiões cerebrais responsáveis pelo processamento de imagens e compreensão da

linguagem escrita e falada (Princípio #2, Centro de Pesquisa em Ciências da Aprendizagem da Austrália<sup>7</sup>).

Quanto ao MC, a memória episódica faria a composição ponto a ponto do momento da aprendizagem, como o registro das imagens ou ícones presentes e suas posições espaciais (direita, esquerda, acima, abaixo) associadas a grupos de conceitos.

#### 2.3.4.4 Mapa com cores/contrastes

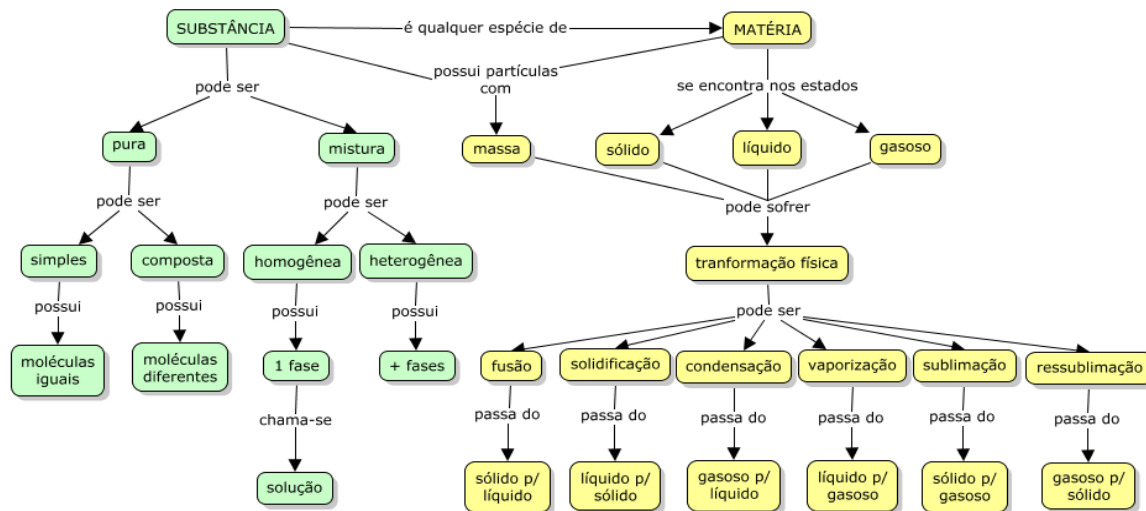
Essa proposta surge com elementos indispensáveis para o direcionamento automático da atenção do estudante: o contraste e a novidade. Um dos princípios básicos da atenção é que não se consegue manter o foco em mais de uma coisa por vez (Lent, 2010). “É natural intuir que essa ação focalizadora só se torna possível porque conseguimos sensibilizar seletivamente um conjunto de neurônios de certas regiões cerebrais que executam a tarefa principal, inibindo as demais” (Lent, 2010, p. 631).

Nesse sentido, é recomendado guiar a atenção do leitor ao longo do MC por meio da marcação de informações que de alguma forma fazem parte de uma mesma categoria (Figura 14). Em se tratando de MC cíclico, uma pesquisa conduzida por Aguiar e Correia (2016) mostrou que a inserção de cores em grupos de conceitos mais próximos produziu um desempenho maior do que a utilização de MCs sem cores ou com indicadores numéricos para guiar a leitura.

---

<sup>7</sup> *PEN Principle #2 – Visual images and spoken word mix well*. Disponível em: <https://www.slrc.org.au/pen-2-visual-images-spoken-word-mix-well/>.

Figura 14 – Exemplo da aplicação de cores/contrastes em MC sobre propriedades da matéria. As cores setorizam as categorias que complementam o conteúdo.



Fonte: Os autores.

A inserção de cores e de formas geométricas para diferenciar hierarquias ou grupos conceituais, bem como de tamanhos de fontes diferentes ou, ainda, aplicar negrito, pode gerar uma sensação de conforto durante a organização do conhecimento, considerando que a predição espacial dos alvos é um dos princípios de aprendizagem envolvidos na conceitualização (Princípio #3, Centro de Pesquisa em Ciências da Aprendizagem da Austrália<sup>8</sup>).

A pesquisa de Summerfield e Egner (2009) sugere que o cérebro humano tende a organizar as informações em categorias, inclusive espaciais, para que a recordação seja facilitada, o que torna a dica visual um suporte para a localização de conceitos e proposições de maneira menos dispendiosa, já que expectativas relativas ao espaço são criadas e possivelmente fazem a leitura fluir.

#### 2.3.4.5 Quadro resumo dos tipos de mapas discutidos

Como contribuição para o design instrucional visado pelo ensino, a abordagem teórica deste trabalho deu origem aos exemplos de estruturas de MCs mostrados no Quadro 10, trazendo indicações que comungam com as expectativas de aprendizagem do ponto de vista neurocognitivo, psicológico e educacional.

<sup>8</sup> PEN Principle #3 – Spatial predictability guides attention. Disponível em: <https://www.slrc.org.au/pen-3-spatial-predictability-guides-attention/>.

Quadro 6 – Exemplos de mapas conceituais que consideram alguns princípios da atenção. Mostram apenas as estruturas que atendem às expectativas dos respectivos tipos de mapa. TL = termo de ligação.

Princípio	Tipo do Mapa	Exemplo
<p>Considerar os erros para melhorar a aprendizagem (PEN #8)</p> <p>Pré-ativação de estratégias para guiar a aprendizagem (PEN #12)</p>	<p><i>Mapa com erro</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Avalia as concepções científicas dos alunos</li> <li>- Direciona o foco da atenção para conceitos mais relevantes</li> <li>- Ativa a memória de reconhecimento</li> <li>- Necessita de feedback</li> </ul>	
	<p><i>Mapa com lacuna</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Avalia a retenção da aprendizagem</li> <li>- Chama a atenção para a recordação de conteúdos semânticos</li> </ul>	
<p>Uso do canal visual e verbal para a aquisição de conhecimentos (PEN #2)</p>	<p><i>Mapa com figura (ícones)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilita a consolidação da memória visual</li> <li>- Guia a atenção para conceitos mais relevantes</li> </ul>	
<p>Predição espacial do conteúdo para guiar a aprendizagem (PEN #3)</p>	<p><i>Mapa com cores, formas geométricas diferentes, negrito, sombra, numeração.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Organiza as informações em categorias para facilitar a busca dos conceitos</li> </ul>	

Fonte: Os autores.

### 2.3.5 A Teoria da Carga Cognitiva e a elaboração de materiais instrucionais

A versatilidade de abordagens que têm o MC como ferramenta nos faz refletir sobre as implicações de estratégias textuais e gráficas usadas pelo mapeador. Além da preocupação com a organização proposicional hierárquica, a escolha dos conceitos e termos de ligação podem ser

feitas com base nos conhecimentos prévios dos leitores, enquanto os elementos gráficos (cores, contrastes, figuras) podem ser incorporados ao mapa conceitual com o objetivo de direcionar o foco da atenção para áreas de interesse. Dessa forma, o conhecimento de mecanismos pelos quais a informação é processada no cérebro pode levar à elaboração de MCs mais efetivos.

Enquanto suporte para o design instrucional visado pelo ensino, a Teoria da Carga Cognitiva leva em consideração a capacidade limitada de processamento da informação na memória de trabalho. Somente uma quantidade limitada de informação pode ser processada em qualquer momento, mas um número expressivo de informações organizadas pode ser processado e levar a resultados mais sofisticados (Sweller, 2011).

Nessa perspectiva, a aprendizagem é resultado do processamento de novas informações na memória de trabalho (memória de curto prazo) que interagem com os esquemas já consolidados na memória de longo prazo, transformando-os em novos esquemas (Sweller, 2011). A TCC considera que as novas informações são processadas na memória de trabalho (que é limitada) e articuladas com os esquemas da memória de longo prazo, em que o resultado deve ser o armazenamento de novos esquemas.

De acordo com a TCC, o gerenciamento de informações na memória de trabalho demanda cargas cognitivas de naturezas distintas:

- *Carga cognitiva intrínseca* – tem relação com a complexidade do conteúdo a ser aprendido; quanto mais informações associadas a um dado conceito forem requisitadas para a compreensão desse conceito, maior será o esforço cognitivo empreendido.
- *Carga cognitiva extrínseca* – tem relação com o formato da tarefa que organiza o conteúdo a ser ensinado; quanto mais elementos distraidores fizerem parte do procedimento instrucional, maior será o esforço cognitivo empreendido.

A complexidade do conteúdo e o nível de compreensão do estudante são determinantes para a carga cognitiva intrínseca, mas ela não pode ser modificada pelo fato de se expressar devido a esses dois fenômenos que são inalteráveis, quando fixados o conteúdo e o nível do estudante. A construção de um MC sobre o átomo por um aluno e outro por um professor de química, por exemplo, pode demandar cargas cognitivas intrínsecas diferentes porque os níveis de compreensão dos sujeitos podem ser também diferentes. A outra maneira de causar mudanças na carga cognitiva intrínseca seria alterando o conteúdo, o que influi, portanto, na sua complexidade (Sweller, 2011).

A forma como os procedimentos instrucionais são apresentados é a principal fonte de recursos cognitivos a serem processados na memória de trabalho, constituindo-se na carga cognitiva extrínseca. Tal carga pode e deve ser gerenciada visando à sua redução para propiciar melhores condições de aprendizagem.

É com base na ideia de gerenciamento dos materiais instrucionais apresentada na TCC que propomos a utilização de mapas conceituais elaborados pelo professor para: a) reduzir a carga cognitiva extrínseca imposta pelas atividades de sala de aula, evitando, assim, sobrecarga cognitiva; b) aumentar a capacidade de elaboração conceitual, ou atividade mental, para construir e automatizar esquemas cognitivos.

#### 2.3.5.1 As noções da atenção e da carga cognitiva na prática

As noções sobre os mecanismos da atenção e sobre o processamento da informação discutido na TCC se apresentam como bases para o planejamento, elaboração, implantação e avaliação da aplicação de mapas conceituais em sala de aula. Para tal, sugere-se a observação de dois procedimentos:

- *Avaliação do contexto de aprendizagem*: a natureza do conteúdo a ser mapeado, o nível de compreensão dos estudantes e a definição dos objetivos de aprendizagem devem orientar a escolha do tipo de mapa conceitual a ser elaborado.
- *Definição de elementos de contraste*: identificação de conceitos ou grupos de conceitos que podem servir de gatilho para provocar processos atencionais.

O primeiro procedimento se refere aos cuidados necessários para a elaboração de um mapa conceitual adequado. Não há regras para o uso de certo tipo de mapa, pois o mapa com erro, com lacunas ou com figuras pode ser usado na aula introdutória, de revisão ou avaliação. O seu uso vai depender dos objetivos de aprendizagem do professor e dos conhecimentos prévios dos alunos. O importante é levar em consideração as noções de carga cognitiva intrínseca e extrínseca para propiciar experiências de aprendizagem significativas. Para a produção do mapa conceitual, recomenda-se o aplicativo computacional *CmapTools*<sup>9</sup> e a leitura das recomendações sobre como construir um bom mapa conceitual (Aguiar; Correia, 2013).

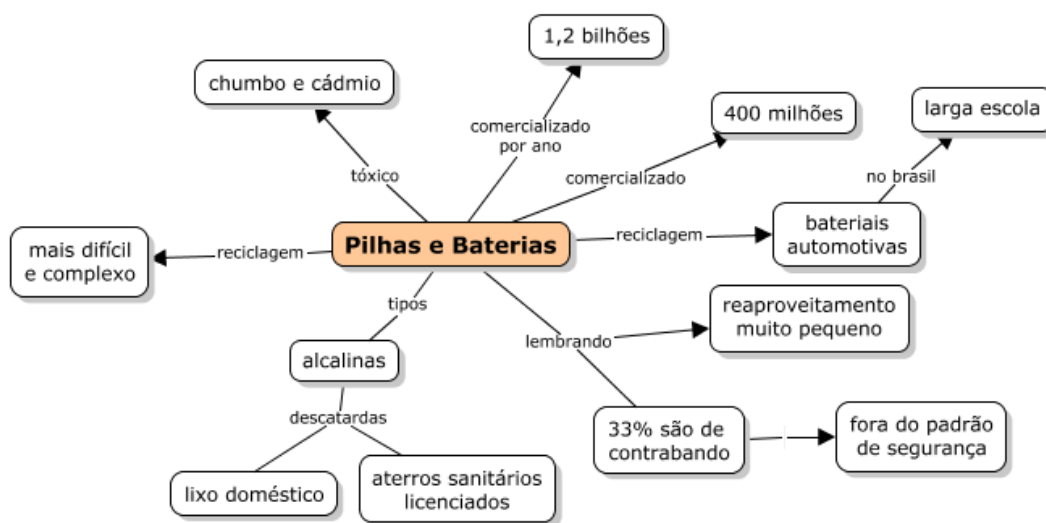
---

<sup>9</sup> O download do aplicativo pode ser feito gratuitamente em: <https://cmap.ihmc.us/>.

O procedimento posterior tem a ver com a escolha do suporte gráfico para direcionar o foco da atenção do leitor. As noções sobre o funcionamento da atenção são importantes porque podem conduzir a boas configurações de mapas conceituais de modo a propiciar o engajamento atencional do estudante.

Quando não se tem tempo para avaliar e gerar feedback para o aluno, o mapa produzido por ele pode não ter cumprido seu papel. A Figura 15 mostra um exemplo de mapa conceitual construído por um aluno inexperiente (em mapeamento conceitual) do 2º ano do Ensino Médio.

Figura 15 – Mapa conceitual síntese de um texto sobre o descarte de pilhas e baterias. O aluno foi instruído, em 5 minutos, sobre como construir um mapa conceitual (noções de hierarquia, conceitos e termos de ligação).



Fonte: Os autores.

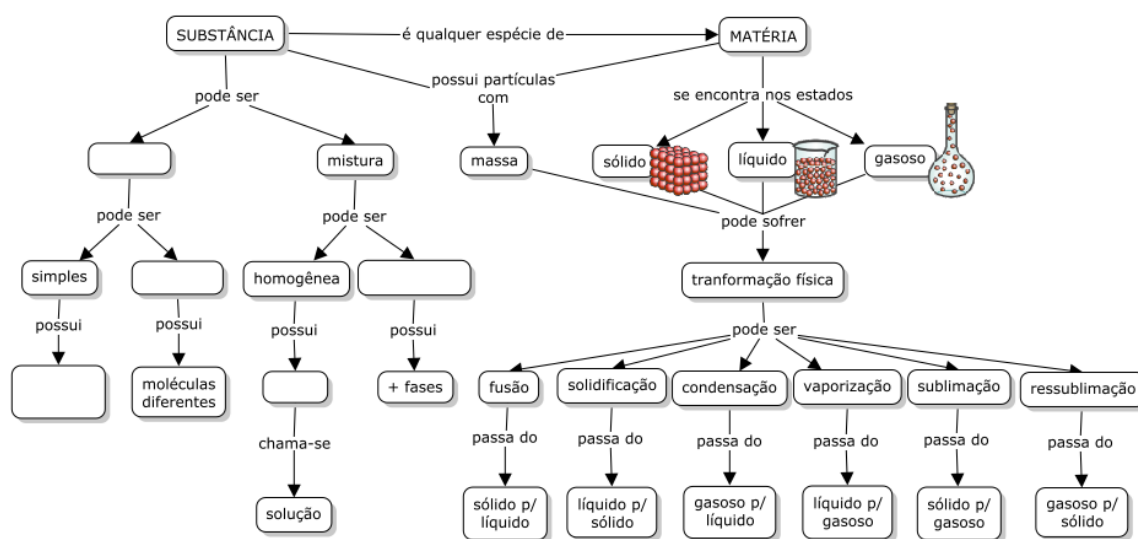
Nota-se que, devido à inexperiência do aluno, o mapa conceitual foi construído de maneira intuitiva, não atendendo à proposta de organização gráfica do conhecimento em níveis conceituais hierárquicos ou de inclusão de termos de ligação apropriados.

Enquanto sugestão do uso de mapa conceitual produzido pelo professor, analisemos a situação hipotética a seguir. Ao considerar a realização de uma atividade com mapa conceitual para trabalhar o conteúdo introdutório “propriedades da matéria”, o professor avalia o contexto de aprendizagem e se certifica de que os alunos têm noção sobre partículas elementares e elemento químico. O conteúdo é pouco abstrato e se encontra num nível experimental facilmente observável, mas a preocupação se centra nos termos técnicos novos. O objetivo é introduzir o tópico “transformações físicas da matéria”, mas também revisar o tópico anterior “substância pura e mistura”. Para isso, o professor prepara uma apresentação multimídia

(projeto) com exemplos ilustrativos sobre transformações físicas no nível macroscópico. O tópico “substância” será revisado oralmente, apenas.

Nessas circunstâncias, uma sugestão (Figura 16) pode incluir estratégias do mapa com lacunas (para revisão de conteúdo) integrado ao mapa com figuras (para introdução de novos conceitos).

Figura 16 – Mapa conceitual produzido para revisão e introdução de tópicos de química (substância e matéria, respectivamente)



Fonte: Os autores.

Os elementos de contraste adicionados foram lacunas e figuras (ícones). As lacunas têm o papel de ativar memórias através da recordação ativa (Verdi *et al.*, 1997) de conceitos mais próximos. Ao ler o conceito “mistura”, por exemplo, há uma tendência em buscar informações nos arquivos de memória mais ou menos idênticas às codificadas no momento de aprendizagem (Schacter; Buckner, 1998). Dessa forma, se comparado com um mapa repleto de lacunas, essa estratégia minimiza a carga cognitiva extrínseca por dispor de elementos que ao mesmo tempo em que solicitam, também facilitam a recuperação de informações.

As lacunas são também destaques que possivelmente chamam a atenção do leitor por fugirem do padrão estrutural do mapa conceitual, mas sucedem a percepção das figuras, pois essas chamam mais atenção por possuírem informações salientes, levando a processos perceptivos imediatos. As figuras/ícones representam as informações verbais do mapa conceitual e pictóricas dos slides do professor de uma forma microscópica, trazendo novas informações importantes para serem decodificadas ao longo da aula, tais como a noção de calor

e de agitação das partículas. Assim, a inclusão de conceitos e figuras espacialmente integrados pode contribuir para o aumento do desempenho do aluno (Mayer, 2014).

As figuras foram incluídas apenas para o conteúdo principal da aula, “transformações físicas”, com o objetivo de: a) direcionar o foco da atenção de modo automático para permitir a seleção dos conceitos principais (processamento *bottom-up*); b) evocar memórias, de longo prazo, associadas à noção de movimento de partículas para a compreensão do conteúdo (processamento *top-down*) e sustentação da atenção na atividade; conduzir a focalização da atenção de forma voluntária para buscar outras respostas; c) deixar registros de memória visuoespacial para uma melhor transferência de conhecimentos (Summerfield; Egner, 2009).

Nesse contexto hipotético, percebe-se que o mapa conceitual aparece para complementar os recursos de aprendizagem, não repetindo, necessariamente, as informações de outra forma. Os slides preparados pelo professor contêm exemplos ilustrativos, enquanto o mapa conceitual contém proposições que, em conjunto, narram o conteúdo, além de trazer, estrategicamente, figuras que definem outros conceitos não apresentados (calor, agitação das partículas). Para a revisão de “substância” o professor poderia sugerir uma discussão em dupla, seguido de feedback e explicações dos alunos sobre suas respostas.

Para a introdução de “transformações físicas” o professor poderia iniciar com uma contextualização; pedir para os alunos explicarem o mapa conceitual entre eles; levantar as dúvidas quanto aos conceitos novos; apresentar os slides com os exemplos; pedir para os alunos explicarem novamente suas compreensões.

Portanto, o exemplo dado serve como um convite à reflexão e implementação de estratégias pedagógicas baseadas nas noções de processamento da informação com ênfase nos mecanismos atencionais.

### **2.3.6 Considerações finais**

A abordagem teórica deste trabalho deu origem a exemplos de estruturas de mapas conceituais constituídos de elementos gráficos que tendem a regular os processos atencionais e propiciar melhores condições de aprendizagem. O objetivo foi apresentar teorias que justificam o planejamento, elaboração e aplicação de mapas conceituais com erros, lacunas, figuras/ícones e setorização de conteúdo com cores/contrastes. Hoje, algumas propostas de livros didáticos já trazem organizadores gráficos prontos no final dos capítulos, demonstrando que essa alternativa (mapa produzido pelo professor/especialista) tem sido aplicada e pode ser aprimorada.

Saber elaborar e gerenciar materiais instrucionais de forma que o aluno direcione a atenção para o alvo e permaneça focado na tarefa pode ser a chave para um ensino de qualidade. Cabe salientar que a leitura do mapa é um processo que requisita a atenção concentrada e precisa ser bem estruturado para ter o efeito esperado. Deve-se, ainda, evitar a sobrecarga cognitiva devido à saturação dos esquemas gráficos com informações visuais desnecessárias e/ou confusas.

### **3 DESENHO METODOLÓGICO**

Em termos de estrutura interpretativa, esta pesquisa de doutorado está alicerçada em crenças filosóficas associadas ao pragmatismo. Desse modo, assume-se enquanto crença ontológica que a realidade é o que é útil, é prático e funciona. Enquanto crença epistemológica, a realidade é conhecida por meio de estratégias múltiplas, empregando-se diferentes instrumentos de pesquisa, podendo refletir evidências dedutivas e indutivas. Quanto à crença axiológica, os valores se apresentam conforme as visões do pesquisador e dos participantes, refletindo-se em posicionamentos, escolhas metodológicas e práticas características. Por fim, a crença metodológica associada ao pragmatismo oportuniza o emprego de abordagens qualitativas e quantitativas para a coleta e análise dos dados (Creswell, 2014a).

Dessa forma, em compatibilidade com o pragmatismo, as estratégias de coleta e análise dos dados seguem métodos mistos. Mais especificamente, métodos mistos sequenciais explicativos, em que a interpretação dos estudos ocorre a partir da coleta e análise de dados quantitativos acompanhados da coleta e análise de dados qualitativos (Creswell, 2014b).

#### **3.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS**

##### **3.1.1 Objetivo geral**

Investigar os efeitos de intervenções didáticas mediadas por realidade aumentada e virtual na aprendizagem de geometria molecular.

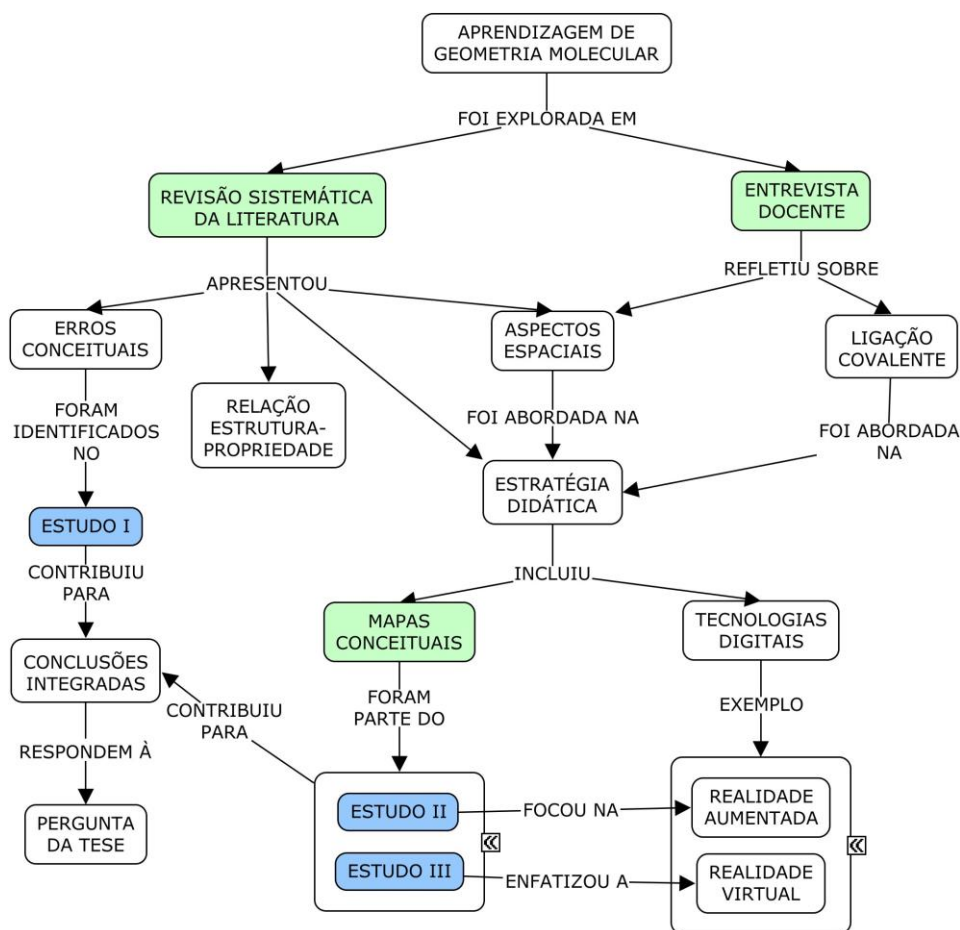
##### **3.1.2 Objetivos específicos**

- [ESTUDO I] Identificar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio de um teste diagnóstico de dois níveis;
- [ESTUDO II] Avaliar o efeito da aplicação de mapa conceitual com realidade aumentada na aprendizagem de geometria molecular;
- [ESTUDO III] Avaliar como a realidade virtual, associada a outras estratégias didáticas, pode facilitar a visualização e o entendimento de estruturas moleculares por estudantes com diferentes níveis de conhecimento prévio.

### 3.2 ORGANIZAÇÃO DOS ESTUDOS

Conforme mostrado na Figura 17, inicialmente, conduziu-se uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de estabelecer as estratégias de pesquisa mais adequadas para responder à pergunta da tese. Essa etapa abriu um leque de possibilidades de investigação. Complementou-se a exploração com a realização de entrevistas com dois professores especialistas em química, visando conhecer suas perspectivas e experiências acerca da aprendizagem de geometria molecular. A última etapa de exploração incluiu uma pesquisa teórica sobre a aprendizagem mediada com mapas conceituais contendo elementos gráficos.

Figura 17 – Mapa conceitual “Como os estudos I, II e III se relacionam com as investigações preliminares?”



Fonte: O autor.

A revisão sistemática da literatura abordou tópicos como erros conceituais, relação estrutura-propriedade, aspectos visuoespaciais e estratégias pedagógicas. Segundo os docentes entrevistados, compreender a ligação covalente é essencial para a aprendizagem da geometria molecular, destacando também a importância da percepção espacial e da natureza dinâmica das

moléculas. No contexto desta tese, avaliou-se estratégias didáticas envolvendo mapas conceituais e realidade aumentada na primeira intervenção, resultando nos estudos I e II, e realidade virtual na segunda intervenção, resultando no estudo III. A combinação desses três estudos proporcionou informações valiosas, contribuindo para as conclusões integradas em resposta à questão de pesquisa da tese.

A metodologia de cada um dos três estudos foi definida sob condições específicas. Os estudos I e II foram realizados durante a primeira intervenção, embora apresentados de forma separada para facilitar a exposição dos resultados. Essa fase envolveu estudantes com um nível considerável de conhecimento prévio em química. O estudo I foi caracterizado pela análise qualitativa dos dados, enquanto no estudo II adotou-se uma perspectiva quantitativa. No estudo II, a participação do pesquisador se limitou a fornecer instruções para a execução das atividades, sem envolvimento direto na intervenção. Por outro lado, o estudo III, referente à segunda intervenção, teve o pesquisador assumindo um papel mais ativo, atuando como professor e intervindo diretamente no processo educativo. Este estudo contou com a participação de estudantes com diferentes níveis de conhecimento prévio em química e adotou uma abordagem mista na coleta e análise dos dados.

Enquanto etapa crucial para a compreensão das concepções dos estudantes acerca da aprendizagem de geometria molecular, a identificação dos erros conceituais no estudo I contribuiu para mostrar a importância de um diagnóstico preliminar, seja no contexto de pesquisa acadêmica ou sala de aula. Em relação às estratégias adotadas para investigar os impactos das tecnologias de realidade aumentada e virtual na aprendizagem, o estudo II focou no efeito da tecnologia de realidade aumentada na percepção espacial, sem se preocupar exclusivamente com o ganho de aprendizagem. Já no estudo III, não houve comparação de grupos em relação à efetividade da tecnologia, mas em relação ao nível de conhecimento prévio dos estudantes. Verificou-se, portanto, como e para quem a tecnologia de realidade virtual é eficaz.

Dessa forma, a pesquisa contempla três investigações exploratórias (seção 2) que nortearam o planejamento e condução das três investigações/estudos principais (seção 4). Esse formato proporcionou a produção de seis artigos científicos, cujo objetivo foi disseminar os resultados preliminares para a comunidade o mais cedo possível, beneficiando-se de feedback construtivo ao longo do doutorado.

Portanto, essa estratégia enriqueceu o processo de investigação e orientou a configuração textual da tese. Para preservar a integridade e o formato original dos artigos

submetidos e/ou publicados, as seções correspondentes são apresentadas conforme aparecem nos artigos, incluindo títulos, resumos, introduções, fundamentos teóricos específicos, metodologias, resultados e considerações finais. As referências bibliográficas, por sua vez, estão todas compiladas no final do documento.

### 3.3 GARANTIAS ÉTICAS

A realização das duas intervenções didáticas foi autorizada pelo comitê de ética em pesquisa. No caso da primeira intervenção e entrevista docente, conduzida na Universidade de São Paulo, todos os aspectos éticos foram garantidos (Apêndice A) conforme o projeto enviado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Humanos (CAAE: 51327721.7.0000.5390). Já no caso da segunda intervenção, conduzida na Universidade de Surrey (Inglaterra), após a Autoavaliação para Governança e Ética (1046015-1045997-115144310, SAGE-HDR), a submissão do projeto ao comitê de ética foi dispensada por não apresentar, segundo as regras da instituição, riscos aos participantes. No entanto, seguiu-se todas as orientações do guia de ética da instituição, conforme consta na folha de informações ao participante (Apêndice B).

Antes da coleta de dados, apresentou-se aos participantes uma síntese do projeto de pesquisa, incluindo seus objetivos e procedimentos, além de se providenciar a leitura e assinatura do termo de consentimento. Com isso, os estudantes declararam estar cientes dos procedimentos da pesquisa e concordaram/autorizaram o uso das informações obtidas nas atividades pedagógicas para fins de pesquisa e publicação, assegurando que nenhuma identificação individual seria divulgada.

## 4 CONTEXTOS, MÉTODOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS ESTUDOS I, II E III

### 4.1 ESTUDO I: ESTRATÉGIA PARA IDENTIFICAR ERROS CONCEITUAIS DE QUÍMICA: INCOMPREENSÕES EM TORNO DA APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR<sup>10</sup>

Estudos acerca de erros conceituais de geometria molecular foram majoritariamente realizados no âmbito internacional e revelaram concepções errôneas importantes para a compreensão das dificuldades de aprendizagem. No entanto, não há pesquisas explorando erros conceituais associados à percepção espacial das moléculas no estudo da geometria molecular.

O objetivo desta pesquisa foi identificar e avaliar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio da elaboração e aplicação de um teste diagnóstico de dois níveis. Utilizou-se uma metodologia mista para a categorização e análise dos dados coletados de 55 estudantes ingressantes no nível superior (graduação em biotecnologia) de uma universidade pública.

O estudo revelou erros importantes acerca das noções de geometria molecular e nos convidam a refletir estratégias didáticas para os diferentes níveis de ensino (médio e superior). Verificou-se que estudantes possuem dificuldades para entender diferentes aspectos de múltiplas representações, afetando negativamente a compreensão da transição entre uma representação bidimensional e tridimensional. As duas primeiras questões do teste diagnóstico de dois níveis permitiram identificar cinco erros conceituais associados com a percepção tridimensional das moléculas, evidenciando que estudantes possuem concepções equivocadas acerca da relação entre a disposição espacial e os princípios que a fundamenta.

#### 4.1.1 Introdução

As dificuldades de aprendizagem associadas à geometria molecular têm sido estudadas sob diferentes perspectivas. A necessidade de trabalhar o conteúdo para relacionar as

---

<sup>10</sup> O conteúdo desta seção secundária foi publicado em periódico científico com antecedência. Utilize a referência a seguir para citar alguma passagem específica desta seção: SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 23, e42082, p. 1-21, 2023. DOI: [10.28976/1984-2686rbpec2023u579599](https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2023u579599).

propriedades das substâncias com a estrutura molecular (Stowe *et al.*, 2019) e/ou para facilitar a visualização de moléculas por meio de recursos alternativos (Silva; Fonseca, 2021) tem impulsionado, portanto, o desenvolvimento de estratégias didáticas importantes.

Com o aumento de pesquisas acerca da aprendizagem de geometria molecular, a questão da visualização e desenvolvimento de habilidades espaciais para lidar com a noção de moléculas tridimensionais recebeu uma atenção considerável. Devido ao acesso cada vez mais facilitado aos recursos tecnológicos, atualmente, aplicativos digitais prometem minimizar as dificuldades de visualização de estruturas tridimensionais para que a aprendizagem faça mais sentido. O problema é que, ao longo do processo educativo, estudantes vão adquirindo concepções equivocadas que passam a fazer parte do repertório conceitual deles(as), dificultando a compreensão do assunto.

A situação colocada é que mesmo após as instruções do professor, estudantes podem permanecer com concepções errôneas. Isso porque eles(as) geralmente possuem uma concepção prévia acerca de um assunto, mas podem resistir às mudanças de concepções, uma vez que os(as) “estudantes usam seu conhecimento existente (ex. sua ecologia conceitual), para determinar se as diferentes condições se encontram, ou seja, se uma nova concepção é inteligível (sabe o que significa), plausível (acredita que é verdade), e frutífera (considera útil)” (Hewson, 1992, p. 8, tradução nossa). As concepções equivocadas/errôneas são consideradas erros conceituais, uma vez que se apresentam como concepções científicas que podem até fazer sentido em determinados contextos, mas que precisam ser desconstruídas por serem inconsistentes. Assim, a noção de erro conceitual concebida na presente pesquisa pode ser descrita como ideias adquiridas em contextos formais e informais que – não sendo significativas do ponto de vista científico – impedem o avanço nos estudos (Soeharto *et al.*, 2019). Trata-se, portanto, de conhecimentos não estruturados que acabam se tornando obstáculos de aprendizagem.

Conforme será apresentado, estudos acerca de erros conceituais de geometria molecular foram majoritariamente realizados no âmbito internacional e revelaram concepções errôneas importantes para a compreensão das dificuldades de aprendizagem. No entanto, não há pesquisas explorando erros conceituais associados à percepção espacial das moléculas no estudo da geometria molecular. Como os(as) estudantes concebem a transição entre uma representação bidimensional e tridimensional? Como a conformação tridimensional se revela na visão dos(as) estudantes?

O objetivo desta pesquisa foi, portanto, identificar e avaliar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio da elaboração e aplicação de um teste diagnóstico de dois níveis. A hipótese é que, para além do já relatado na literatura, existem erros conceituais associados às representações tridimensionais.

Essa pesquisa se justifica pela necessidade de se identificar os percalços da aprendizagem de conceitos científicos para que docentes possam planejar o ensino cientes de que algo precisa ser feito para evitar a propagação de concepções equivocadas. Dessa forma, a mediação da aprendizagem a partir de erros conceituais pode enriquecer os feedbacks, levando-se em consideração que determinados equívocos aparecem com frequência nas concepções científicas dos(as) estudantes.

#### **4.1.2 Erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular**

Em uma obra de 85 páginas, cujo objetivo foi mapear os principais erros conceituais de química básica, Kind (2004) faz apenas uma menção à geometria molecular, quando mostra uma concepção equivocada associada à noção de ligação covalente. Para os(as) estudantes entrevistados por Perterson e Treagust (1989) e citados por Kind (2004), cerca de um quarto deles considerou erroneamente que a geometria molecular resulta dos pares de elétrons ligantes, ou devido à polaridade da ligação. Porém, conforme mostrado na sequência, pesquisas foram realizadas de forma mais específica, revelando outros erros conceituais.

É comum estudantes se equivocarem ao explicar a orientação espacial das moléculas com base na Teoria da Repulsão dos Pares de Elétrons da Camada de Valência (TRPECV). Birk e Kurtz (1999) e Özmen, Demircioglu e Demircioglu (2008) identificaram que os(as) estudantes compreendem que a forma das moléculas se deve apenas à repulsão entre os pares de elétrons ligantes, ou que a forma das moléculas é devida apenas à repulsão entre pares de elétrons não ligantes. Por um lado, há a compreensão de que somente os pares de elétrons ligantes influenciam na configuração espacial da molécula, o que nos leva a sugerir que alguns estudantes não relacionam os átomos com sua natureza eletrônica para prever a disposição espacial da molécula, mas se preocupam em como representar fielmente uma fórmula molecular, considerando a maior distância possível entre um átomo e outro. Por outro lado, há a compreensão de que os pares de elétrons não ligantes são os únicos responsáveis pela forma da molécula, sugerindo que o fato de existirem pares de elétrons não ligantes em torno do átomo central faz os(as) estudantes suporem que essa nuvem de elétrons “empurra” os demais átomos.

Dessa forma, fica evidente que comumente não há entendimento da natureza eletrônica dos átomos e das ligações químicas.

A geometria da molécula também é percebida pelos(as) estudantes como resultado do número de átomos ligados ao átomo central (Özmen; Demircioglu; Demircioglu, 2008). Um erro comum é pensar que as moléculas  $\text{BF}_3$  e  $\text{NH}_3$  possuem a mesma geometria molecular, porque ambas possuem três átomos ligados ao átomo central. Esse fato revela mais uma vez que alguns estudantes desconsideram teorias para prever a forma das moléculas, utilizando-se apenas da fórmula molecular como uma dica para representar a molécula em três dimensões. Essa constatação é corroborada por Uyulgan, Akkuzu e Alpat (2014), os quais perceberam um erro conceitual quando os(as) estudantes afirmaram que para as moléculas  $\text{BeBr}_2$  e  $\text{SCl}_2$ , suas geometrias moleculares são lineares e os tipos híbridos são  $\text{sp}^3$ . Dessa forma, verifica-se que as geometrias moleculares podem ser previstas erroneamente a partir da quantidade de átomos ligados ao átomo central, desconsiderando-se noções de hibridização.

A utilização da estrutura de Lewis é recomendada para a previsão da geometria molecular e, por esse motivo, estudantes falham quando alguma molécula foge à regra do octeto. Karonen *et al.* (2021) perceberam dificuldades na representação de moléculas, tendo em vista que alguns estudantes acreditam que a regra do octeto se aplica a todos os exemplos. Ainda como consequência da falta de clareza quanto às possibilidades de formação de compostos, muitas vezes resultado da instrução falha das noções de ligações químicas, sempre nos deparamos com a concepção de que o Xe não pode formar ligações, pois é um gás nobre (Uyulgan; Akkuzu; Alpat, 2014).

Outro problema relatado tem a ver com a representação espacial ou desenho da estrutura de Lewis a partir da forma molecular. Estudantes acreditam que a fórmula molecular orienta necessariamente a ordem dos átomos durante o desenho da sua representação estrutural (Karonen *et al.*, 2021). Os autores citam Cooper, Grove e Underwood (2010), os quais também perceberam que a estrutura desenhada varia dependendo de como a fórmula molecular é apresentada. Assim, estudantes desenharam corretamente a estrutura para  $\text{CH}_3\text{OH}$ , mas falham para  $\text{CH}_4\text{O}$ , sugerindo que podem utilizar estratégias mnemônicas para resolver os problemas sem necessariamente ter noções de valência dos elétrons de um átomo e sua representação de acordo com a estrutura de Lewis. Assim, nessa mesma perspectiva, foi observado por Karonen *et al.* (2021) e Stowe *et al.* (2019) que um erro conceitual comum é considerar que modelos moleculares como o de bolas e varetas não têm relações com concepções teóricas. Ou seja, considerar que os(as) estudantes vão ter um entendimento das representações moleculares do

ponto de vista do(a) docente é um equívoco, tendo em vista que eles(as) veem os modelos moleculares como instrumentos de visualização das geometrias, mas não necessariamente para explicar ou interpretar processos físicos ou químicos.

O estudo da geometria molecular isoladamente não produz os efeitos esperados pelo ensino, que envolve a compreensão da relação estrutura-propriedade para explicar os fenômenos químicos e físicos. Portanto, o estudo das propriedades dos compostos requer a aquisição de noções sobre ligações químicas intramoleculares, ligações intermoleculares e polaridade. No entanto, a concepção errônea de que a ligação formada por um átomo de carbono (C) com o átomo de hidrogênio (H) é chamada de ligação de hidrogênio (Akkuzu; Uyulgan, 2016) tem limitado a aprendizagem de conceitos como forças intermoleculares e polaridade, importantes para a compreensão das propriedades das substâncias.

No rol de concepções trazidas, a última traz um erro conceitual que retoma o fato de estudantes aprenderem regras sem ter consciência das explicações científicas. É comum estudantes pensarem que para as moléculas  $\text{NH}_3$  e  $\text{NF}_3$ , se as geometrias das moléculas têm uma forma piramidal trigonal, os ângulos de ligação não podem ser diferentes (Uyulgan; Akkuzu; Alpat, 2014). Erro conceitual desse tipo se deve, em parte, à desconexão entre a TRPECV e os conceitos de hibridização e regra de Bent (Clauss *et al.*, 2014). De acordo com a regra de Bent (1961), os átomos ou grupos substituintes de maior eletronegatividade – como o F em  $\text{NF}_3$  – tendem a atrair orbitais de maior caráter p, diminuindo, portanto, o ângulo de ligação.

#### 4.1.3 Metodologia

Com o intuito de atender ao objetivo proposto, optou-se pela pesquisa mista, pois esse método permite coletar, analisar e integrar os dados quantitativos e qualitativos de modo a gerar uma teorização mais robusta e, conseqüentemente, um maior entendimento dos fenômenos em estudo (Sampieri; Collado; Lucio, 2013).

O público-alvo incluiu trinta e um estudantes do sexo masculino e vinte e quatro do sexo feminino, totalizando cinquenta e cinco estudantes ( $n=55$ ) – faixa etária dos 16 aos 22 anos – recém ingressantes em um curso de graduação (biotecnologia) de uma universidade pública. Os autores solicitaram autorização aos docentes responsáveis pela disciplina “Química Geral” para convidar os(as) estudantes a participarem da pesquisa em horário de aula. Os conhecimentos avaliados são referentes ao que os(as) estudantes aprenderam no Ensino Médio.

Os dados para análise derivaram das respostas ao teste diagnóstico de dois níveis (*two-tier*) sobre geometria molecular (Apêndice C). No laboratório de informática, solicitou-se que os(as) estudantes acessassem o ambiente virtual de aprendizagem (*MOODLE*) e respondessem o teste diagnóstico pelo período máximo de 45 minutos.

Todos os aspectos éticos foram garantidos conforme o projeto enviado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Humanos (CAAE: 51327721.7.0000.5390).

#### 4.1.3.1 Elaboração, validação e confiabilidade do instrumento de coleta e análise de dados

O teste diagnóstico de dois níveis (*two-tier*) tem sido amplamente utilizado em pesquisas de identificação de erros conceituais na área de ciências (Peterson; Treagust; Garnett, 1989; Peterson; Treagust, 1989; Peterson; Treagust; Garnett, 1986; Uyulgan; Akkuzu; Alpat, 2014; Mutlu; Sesen, 2015; Suri; Azhar, 2020; Métioui; Trudel, 2021). Ele consiste em um conjunto de questões de múltipla escolha acompanhadas de uma segunda opção de resposta, que funciona como um reforço a ser confrontado com a resposta inicial.

Esse tipo de teste é importante para captar as razões por trás das escolhas dos(as) estudantes e permitem a identificação de erros conceituais – muitas vezes difíceis de serem percebidos pelos(as) docentes. Os itens do teste diagnóstico da presente pesquisa foram definidos para confirmar e/ou ampliar – no cenário nacional – erros conceituais identificados na literatura. Além disso, os quatro primeiros itens do teste foram desenvolvidos para investigar erros conceituais associados à inéditos aspectos da disposição espacial das moléculas. O formato “questão de múltipla escolha – questão dissertativa” foi inspirado em Uyulgan, Akkuzu e Alpat (2014).

O teste diagnóstico da presente pesquisa contém 7 questões, sendo que para cada questão há 2 itens, totalizando 14 itens (perguntas). Os itens foram elaborados e discutidos por dois docentes de química. Após a aplicação do teste, obteve-se alfa de Cronbach igual a 0,71, resultando em uma consistência interna adequada para as finalidades dessa pesquisa (Landis; Koch, 1977).

Baseou-se no sistema de pontuação dos itens em Özmen, Demircioglu e Demircioglu (2008), considerando-se para avaliação cada par de itens de cada questão (Tabela 1).

Tabela 1 – Critério de avaliação das questões do teste diagnóstico sobre geometria molecular – Adaptado de Özmen, Demircioglu e Demircioglu (2008)

Categorias		Abreviação	Pontuação
Resposta Correta	Explicação Correta	C-C	3
Resposta Incorreta	Explicação Correta	I-C	2
Resposta Correta	Explicação Incorreta	C-I	1
Resposta Incorreta	Explicação Incorreta	I-I	0

Fonte: Os autores.

A análise dos dados ocorreu em três etapas: (1) Análise descritiva dos dados para identificação do nível de compreensão geral dos(as) estudantes, conforme Silva (2018); (2) Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias mostradas na Tabela 1 (Uyulgan; Akkuzu; Alpat, 2014); (3) Categorização e análise de erros conceituais conforme o modelo apresentado em Peterson e Garnett (1986) e Uyulgan, Akkuzu e Alpat (2014).

#### 4.1.4 Resultados e discussão

Conforme o critério de pontuação descrito na Tabela 1, a nota média obtida no teste diagnóstico – convertida em amplitude potencial de 0 a 10 – foi de 5,24 com desvio de  $\pm 1,9$ . A moda foi 3,3 e mediana 5,7. O valor máximo foi 9,0 e mínimo 1,9, resultando em uma amplitude igual a 7,1. A Tabela 2 mostra a distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias: correto-correto (C-C); incorreto-correto (I-C); correto-incorreto (C-I); incorreto-incorreto (I-I).

Tabela 2 – Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias

Categorias		C-C		I-C		C-I		I-I	
Questão	f	%	f	%	f	%	f	%	
1	17	31	29	53	3	5	6	11	
2	24	44	5	9	10	18	16	29	
3	31	56	0	0	22	40	2	4	
4	13	24	27	49	5	9	10	18	
5	11	20	15	27	10	18	19	35	
6	9	16	17	31	11	20	18	33	
7	2	4	9	16	19	35	25	45	

Fonte: Os autores.

O maior valor percentual de cada questão foi realçado. Quando os 14 itens são avaliados em pares (*two-tier*), obtendo-se, portanto, 7 questões, observa-se que as questões 1 e 4 tiveram os itens abertos mais bem avaliados que os de múltipla escolha. Já as questões 5, 6 e 7 aparecem com um percentual de resposta crítico na categoria incorreto-incorreto (I-I), uma vez que a maior parte dos(as) estudantes errou tanto os itens objetivos quanto os subjetivos.

Os erros conceituais destacados no Quadro 11 foram identificados a partir da análise de todas as respostas do teste diagnóstico de dois níveis.

Quadro 7 – Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias

Aspecto avaliado	Questão	Erro conceitual	Frequência (%)	
Representação tridimensional	1	Na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, a conformação dos átomos passa despercebida, valorizando-se a presença de átomos e tipos de ligações químicas.	22 (40%)	
		Na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, valoriza-se a conformação dos átomos e acredita-se que há átomos de hidrogênios ocultos na representação 3D.	7 (12,7%)	
	2	Valorização do espaçamento claro nas ligações para uma suposta visualização coerente.	13	(30,9%)
			4	
		Representações moleculares lineares – ainda que em formato de bolas e varetas – não são consideradas tridimensionais.	7 (12,7%)	
	Os átomos da representação tridimensional devem seguir a mesma disposição espacial dos átomos da representação estrutural plana correspondente.	21 (38,2%)		
Relação estrutura de Lewis-geometria	3	As diferentes geometrias do CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O se devem aos tipos de ligação.	12 (21,8%)	
		A geometria angular de moléculas como H <sub>2</sub> O é devida apenas à repulsão entre os pares de elétrons não ligantes.	12 (21,8%)	
Relação estrutura-propriedade	4	Uma molécula com pares de elétrons não ligantes no átomo central é polar – ex. XeF <sub>4</sub> .	11 (20%)	
		Átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes geram as mesmas geometrias.	12 (21,8%)	
		Átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes são apolares.	6 (10,9%)	
Relação estrutura-hibridização	5	O Be faz ligação iônica.	7 (12,7%)	

Repulsão eletrônica	6	Quando há par de elétrons não ligantes em uma representação estrutural tridimensional de uma molécula, valoriza-se o posicionamento superior do par de elétrons em detrimento da conformação dos átomos.	10 (18,2%)
Relação eletronegatividade-repulsão eletrônica	7	O ângulo de ligação que dá forma a uma molécula é determinado pela quantidade de elétrons do átomo central (no estado fundamental).	8 (14,5%)

Fonte: Os autores.

#### 4.1.4.1 Representação tridimensional

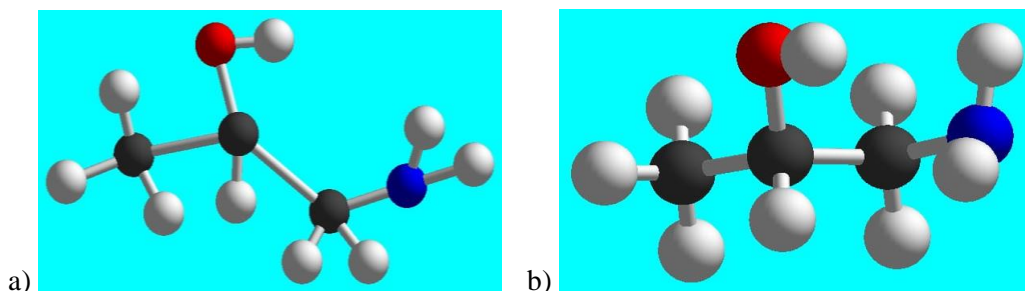
Identificou-se cinco erros conceituais quanto ao aspecto “representação tridimensional”. Para 40% dos(as) estudantes, na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, a conformação dos átomos passa despercebida, valorizando-se a presença de átomos e tipos de ligações químicas. Na primeira questão, quando foi pedido para representar em três dimensões a molécula estrutural plana, alguns estudantes focalizaram em apenas um aspecto da molécula – a presença de átomos de hidrogênio e carbono que estavam ocultos na representação estrutural plana. Um(a) estudante relatou, por exemplo, que escolheu a alternativa (incorreta) porque “contém 3 Carbonos (bolas pretas), 9 Hidrogênios (bolas brancas), 1 Nitrogênio (azul) e 1 Oxigênio (vermelho)”.

Os(as) estudantes (12,7%) que optaram pelas moléculas tridimensionais sem os hidrogênios representados acreditam que a disposição espacial dos átomos deve seguir à representação estrutural plana correspondente. A presença dos dois erros conceituais mencionados sugere que há falhas no desenvolvimento de habilidades espaciais, resultando no impedimento da visualização de moléculas por meio de suas múltiplas representações (Martina, 2017).

Curiosamente, 30,9% dos(as) estudantes afirmaram que a representação molecular em 3D mais coerente é a que apresenta mais clareza das ligações e maior distanciamento dos átomos (Figura 18a). Essa descoberta evidencia que alguns estudantes não manipulam mentalmente as moléculas 3D estáticas para verificar a conformação esperada para os átomos – considerando que na figura alguns átomos parecem estar sobrepostos a outros (Figura 18b). Um(a) estudante relatou, por exemplo, que “todos os carbonos estão com seus respectivos hidrogênios ligados, assim como também há a ligação entre o oxigênio e hidrogênio, dispersados de maneira mais coerente”. Essa valorização equivocada do espaçamento claro nas

ligações para uma suposta visualização coerente foi encontrada nas duas primeiras questões, uma vez que em ambas havia a pergunta acerca da forma mais coerente para representar uma molécula estrutural plana em 3D.

Figura 18 – a) molécula com disposição espacial inapropriada; b) molécula com disposição espacial apropriada



Fonte: Os autores.

Ainda acerca da primeira questão, chamou a atenção o fato de nove estudantes – dos vinte que acertaram o item de múltipla escolha – terem acertado sem apresentar justificativas corretas para os dois aspectos avaliados (presença de átomos e conformação molecular). Eles(as) justificaram apenas com base no primeiro aspecto. Sobre o aspecto da conformação molecular, a possível opção não consciente pela molécula correta, mesmo quando havia outra para efeito de comparação, faz-nos inferir que houve escolha aleatória (“chute”) ou intuitiva com base em aprendizagem implícita (Reber, 1993).

Na segunda questão que avaliou o aspecto da representação tridimensional, houve duas descobertas importantes. Primeiro, verificou-se que a noção de tridimensionalidade de alguns estudantes (12,7%) tem a ver com a forma zigue-zague das moléculas. Para eles(as), as estruturas moleculares lineares não são tridimensionais: “A alternativa escolhida se deve ao fato de a molécula estar realmente representada em 3 dimensões e disposta de forma clara para ver todas os átomos e suas ligações” (Relato de um(a) estudante).

Observou-se que 38,2% dos(as) estudantes acreditam que os átomos da representação tridimensional devem seguir a mesma disposição espacial dos átomos da representação estrutural plana correspondente. Uma situação semelhante foi observada por Silva (2018), quando evidenciou que estudantes tendem a reproduzir tridimensionalmente aquilo que eles veem bidimensionalmente.

Três justificativas incorretas associadas à escolha da molécula em formato linear (letra d da questão 2) chamaram a atenção por deixar transparecer que esse seria o formato ideal por resultar em maior estabilidade para a molécula. Esses exemplos retomam o caso da molécula

(Figura 18a), que também foi consideravelmente escolhida por aparentemente tornar as posições dos átomos mais definidas ou com o maior distanciamento possível entre eles.

Os erros conceituais associados à percepção e manipulação mental de moléculas tridimensionais revelam aspectos preocupantes em se tratando da aprendizagem de geometria molecular. Enquanto educadores, precisamos ficar atentos às metodologias de ensino e recursos didáticos empregados para evitar que erros conceituais como esses sejam inconscientemente reproduzidos.

Portanto, concordamos com Ferk *et al.* (2003) que os educadores precisam ter cuidado para não desenvolver erros conceituais relacionados à forma, tamanho e cores de átomos e moléculas. No caso do ensino por meio de representações, os pressupostos de Martina (2017) são essenciais para compreender e desenvolver estratégias para lidar com múltiplas representações, com o objetivo de atingir a fluência conexional, que é a capacidade de compreender aspectos conceituais a partir de diferentes representações.

#### 4.1.4.2 Relação estrutura de Lewis – geometria molecular

Em geral, houve desempenho satisfatório para responder a terceira questão – principalmente o item de múltipla escolha. Porém, a presença de um erro conceitual encontrado em 21,8% das respostas dos(as) estudantes dá um sinal de alerta quanto à concepção de disposição espacial dos átomos em uma molécula. Para eles(as), as diferentes geometrias do CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O se devem aos tipos de ligação. Assim, de forma simplificada, o CO<sub>2</sub> é linear porque tem ligações duplas e o H<sub>2</sub>O porque tem ligações simples.

Verificou-se que, embora exista uma noção de espacialidade coerente quanto às características das ligações duplas no CO<sub>2</sub>, a falta de explicações com base na repulsão eletrônica dá indícios de que erros conceituais foram formados ao longo do processo educativo. As nuvens de palavras abaixo destacam os 10 conceitos que apareceram com maior frequência nas respostas avaliadas como corretas (Figura 19a) e incorretas (Figura 19b).

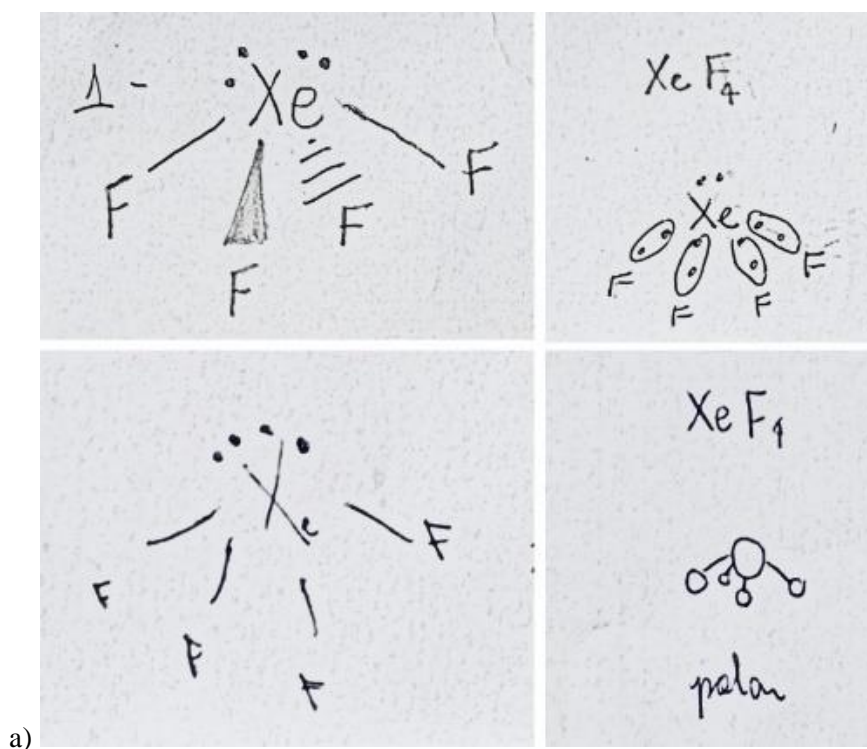


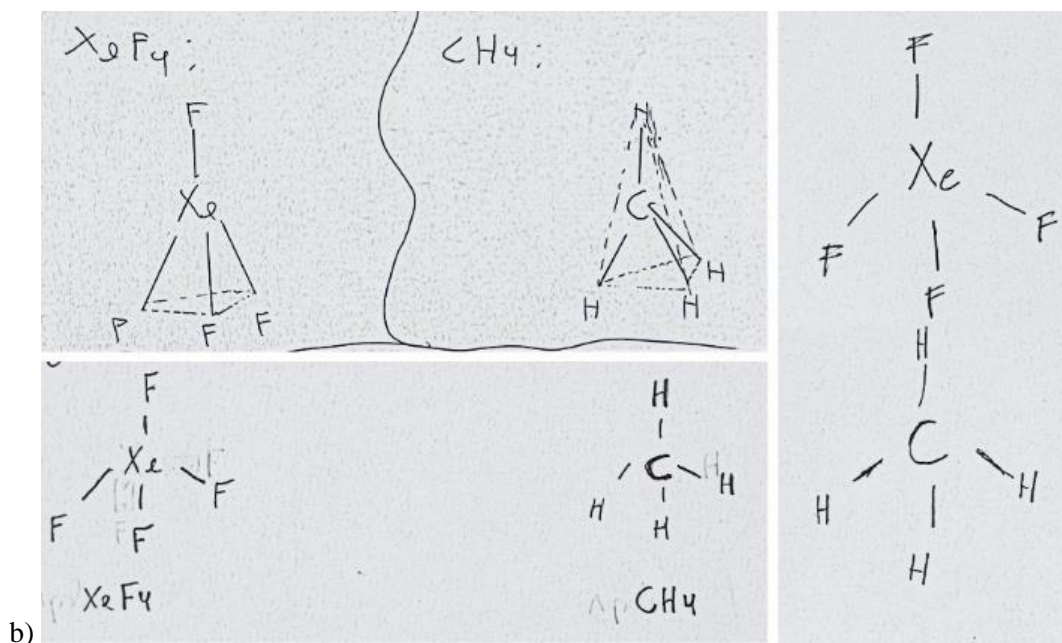
geometria molecular. Essa constatação vai ao encontro dos achados de Peterson e Garnett (1986) e Birk e Kurtz (1999).

#### 4.1.4.3 Relação estrutura-propriedade

Na quarta questão foi possível identificar três erros conceituais. O primeiro erro é considerar que a presença de pares de elétrons não ligantes no átomo central resulta necessariamente em uma molécula polar. Essa ideia foi reportada por 20% dos(as) estudantes e pode ser confirmada com base nos desenhos feitos para a molécula de  $\text{XeF}_4$ , em que a disposição espacial dos átomos e dos pares de elétrons não ligantes sugere que o vetor momento dipolar resultante é diferente de zero (Figura 20a).

Figura 20 – a) Desenhos de  $\text{XeF}_4$  feitos por quatro estudantes; b) Desenhos de  $\text{XeF}_4$  e  $\text{CH}_4$  feitos por três estudantes





Fonte: Os autores.

Outro erro conceitual é assumir que átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes geram as mesmas geometrias. Por causa dessa concepção errada, 21,8% dos(as) estudantes responderam que as geometrias das moléculas de  $\text{XeF}_4$  e  $\text{CH}_4$  são tetraédricas (Figura 20b).

Com um percentual menor, mas não menos importante, alguns respondentes (10,9%) consideraram que átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes são apolares. A partir dessa concepção errada, assume-se que o  $\text{XeF}_4$  e  $\text{CH}_4$  são apolares porque cada átomo central está ligado a outros quatro átomos semelhantes, fazendo com que o vetor momento dipolar resultante seja zero. É importante destacar para os(as) estudantes que essa estratégia é falha e não justifica, por exemplo, o caso da característica polar do  $\text{SF}_4$ .

#### 4.1.4.4 Relação estrutura-hibridização

Na questão 5, a dispersão nas respostas referentes ao item de múltipla escolha mostrou que os(as) estudantes tiveram dificuldades para atribuir as geometrias para as moléculas  $\text{BeH}_2$  e  $\text{SF}_2$ . Essa evidência confirma a falta de familiaridade com casos que fogem à regra do octeto, como a formação do hidreto de berílio.

Trazendo mais informação sobre os conhecimentos prévios quanto à hibridização, o item subjetivo da questão 5 revelou que 12,7% dos(as) estudantes acham que a ligação química entre o Be e o H é do tipo iônica. Averiguou-se que a maioria dos(as) estudantes que acertaram

o item subjetivo conseguiu utilizar a figura como suporte para expressar suas justificativas, ainda que de forma rasa. No entanto, nenhum(a) deles(as) conseguiu desenvolver uma abordagem mais assertiva. O termo “hibridização” ou “estado híbrido”, por exemplo, não apareceu em nenhuma das respostas. Isso sugere que eles(as) têm poucos conhecimentos acerca da teoria da hibridização.

#### 4.1.4.5 Repulsão eletrônica

A sexta questão ilustra mais um caso problemático relacionado à compreensão de aspectos espaciais. Embora 33% dos respondentes tenham errado a questão por completo, observou-se que 46% acertaram somente o item subjetivo. Nas justificativas para a escolha da estrutura incorreta do SF<sub>4</sub> foram identificados 17 motivos corretos. Os(as) estudantes tendem a atribuir a conformação da molécula ao efeito da repulsão eletrônica, mas 18,2% deles(as) foram induzidos(as) à escolha da alternativa incorreta principalmente por pensarem que quando há par de elétrons não ligantes em uma representação estrutural tridimensional, seu posicionamento deve ser sempre acima da representação.

A partir das respostas, verifica-se que faltou flexibilidade espacial nos(as) estudantes para notar que, de acordo com suas próprias justificativas, a geometria da molécula tomaria a forma de uma “gangorra”. Talvez pelo costume de tomarmos como exemplo as moléculas NH<sub>3</sub> e H<sub>2</sub>O e representarmos os pares de elétrons sempre no plano superior, estudantes podem estar desenvolvendo erros conceituais. Assim, é preciso ressaltar o caráter dinâmico das moléculas.

A análise da sexta questão também fez surgir uma reflexão importante. A utilização de representações inadequadas pode confundir os(as) estudantes, considerando que o que eles(as) enxergam nem sempre é o que o(a) docente planeja e espera. Um percentual considerável de respostas (21,8%) continha justificativas embasadas em um suposto movimento de elétrons ou tipo de ligação (dativa) indicado pelas setas das duas figuras. Ou seja, alguns estudantes não entenderam as setas como uma representação da repulsão eletrônica.

Outras respostas (10,9%) sugeriram que a representação correta deveria ser a que mostrasse a repulsão eletrônica (setas) envolvendo mais átomos. Notadamente, verifica-se mais uma falha da representação, tendo em vista que alguns estudantes questionaram o fato de a representação correta não indicar através das setas que a repulsão ocorre entre todas as ligações.

#### 4.1.4.6 Relação eletronegatividade-repulsão eletrônica

A sétima e última questão foi a que teve maior nível de dificuldade e a com mais registros de respostas do tipo “não sei” (29%). Dos(as) estudantes que acertaram o item de múltipla escolha (38%), apenas 3,6% tiveram o item subjetivo avaliado corretamente, sugerindo que houve escolha aleatória. Curiosamente, dos(as) estudantes que erraram o item de múltipla escolha, 36% acertaram o item subjetivo. Mais uma vez, percebeu-se uma dissociação entre a perspectiva espacial e o discurso apresentado, pois mesmo não indicando a representação correta, alguns estudantes justificaram coerentemente que, em geral, a eletronegatividade é responsável pelo deslocamento de densidades eletrônicas e, conseqüentemente, afeta o ângulo da ligação.

O erro conceitual identificado na sétima questão tem a ver com a noção de ângulo de ligação. Erroneamente, 14,5% dos(as) estudantes acreditam que o ângulo de ligação que dá forma a uma molécula é determinado pela quantidade de elétrons do átomo central (no estado fundamental). Nesse contexto, estudantes assumem que quanto maior a quantidade de elétrons do átomo central, maior será a repulsão e ângulo da ligação.

#### 4.1.5 Conclusões e implicações

O estudo das concepções apresentadas pelos(as) estudantes revelou erros importantes acerca das noções de geometria molecular e nos convidam a refletir estratégias didáticas para os diferentes níveis de ensino (médio e superior). Verificou-se que muitos(as) estudantes possuem dificuldades para entender diferentes aspectos de múltiplas representações, afetando negativamente a compreensão da transição entre uma representação bidimensional e tridimensional. Enquanto novidade nesse tipo de investigação, as duas primeiras questões do teste diagnóstico de dois níveis permitiram identificar cinco erros conceituais associados com a percepção tridimensional das moléculas, evidenciando que alguns estudantes possuem concepções equivocadas acerca da relação entre a disposição espacial e os princípios que a fundamenta.

Vale ressaltar que, além da dificuldade de aliar um novo conhecimento às concepções prévias dos(as) estudantes, os recursos instrucionais e abordagens didático-metodológicas empregadas em sala de aula também podem levar ao surgimento de erros conceituais. Dessa forma, o teste diagnóstico contribuiu para identificar treze erros conceituais importantes, de

modo que as práticas que os sustentam poderão ser repensadas a fim de evitá-los. Considerando que os erros conceituais nem sempre são explicitados pelos(as) estudantes e identificados pelo(a) docente em sala de aula, uma estratégia é antecipar – por meio do discurso instrucional – possíveis distorções de compreensão do conteúdo em estudo, a partir dos erros apresentados na Figura 1. Nessa perspectiva, a visão do(a) especialista (docente) pode orientar a aquisição de conceitos por meio de um caminho sem armadilhas ou equívocos.

Em suma, recomenda-se que o trabalho em sala de aula seja realizado com base em modelos moleculares físicos e virtuais, mas que a percepção espacial dos(as) estudantes não seja subestimada, tendo em vista as possibilidades de aquisição de erros conceituais associados à visualização de moléculas. É importante abordar os aspectos conceituais envolvidos em diferentes representações, bidimensionais e tridimensionais, levando-se sempre em consideração que para alcançar a fluência conexional é necessária prática constante com múltiplas representações. Para futuras pesquisas sobre o tema, vislumbra-se investigar o efeito da aprendizagem com moléculas virtuais, como realidade aumentada, no desenvolvimento de habilidades espaciais e superação de erros conceituais, em comparação com o estudo a partir de representações tridimensionais estáticas (em papel).

#### 4.2 ESTUDO II: APRIMORANDO A PERCEPÇÃO ESPACIAL EM GEOMETRIA MOLECULAR ATRAVÉS DO ESTUDO COM MAPAS CONCEITUAIS E TECNOLOGIA DE REALIDADE AUMENTADA<sup>11</sup>

O objetivo foi avaliar o efeito da aplicação de mapa conceitual com realidade aumentada na aprendizagem de geometria molecular. Estudantes ( $n=55$ ) do Ensino Superior responderam a um pré-teste sobre geometria. Separou-se os estudantes em dois grupos para revisarem o assunto com o apoio de um mapa conceitual com moléculas estáticas (grupo A) e de um mapa conceitual com realidade aumentada (grupo B) – recurso digital desenvolvido especialmente para esta pesquisa. Solicitou-se que todos os estudantes construíssem três moléculas físicas com bolas de isopor e palitos. Atribuiu-se uma nota de 0 a 10 para o pré-teste e tarefa de construção de moléculas físicas.

---

<sup>11</sup> O conteúdo desta seção secundária foi publicado em periódico científico com antecedência. Utilize a referência a seguir para citar alguma passagem específica desta seção: SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Aprimorando a Percepção Espacial em Geometria Molecular através do Estudo com Mapas Conceituais e Tecnologia de Realidade Aumentada. **ALEXANDRIA: R. Educ. Ci. Tec.**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 335-353, novembro 2023. <https://doi.org/10.5007/1982-5153.2023.e 91971>

O resultado do pré-teste mostrou que não houve diferença significativa entre os grupos. Na tarefa de construção de moléculas físicas houve diferença significativa entre os grupos. Os resultados sugerem que o desempenho superior do grupo B pode ter sido influenciado por fatores emocionais e de atenção, além da interação com as moléculas em movimento na realidade aumentada, embora essas suposições não tenham sido diretamente comprovadas pela pesquisa principal.

#### **4.2.1 Introdução**

Um dos objetivos do ensino de química é prover explicações científicas para os mais diversos fenômenos da natureza, apresentando o empreendimento científico que vai desde a investigação dos fenômenos até a comunicação dos resultados para o público em geral. Assim, ensinar química não deve se restringir à transferência de conhecimentos pré-determinados, mas contribuir com a sociedade a partir do letramento científico, incluindo o estudo do processo de investigação e construção do conhecimento (Eilam; Gilbert, 2014).

As representações visuais desempenham um papel importante no desenvolvimento do conhecimento científico, uma vez que aproximam o público das questões científicas a partir de modelos e demais representações visuais. Dessa forma, a aquisição de conhecimentos químicos depende substancialmente da interpretação de múltiplas representações (Silva; Fonseca, 2021). Segundo Kozma e Russell (2005, p. 123, tradução nossa), “sempre houve uma forte relação entre a compreensão dos fenômenos químicos e as representações externas que eles usam para representá-los”.

Embora as representações desempenhem um papel importante no aprimoramento da compreensão dos conceitos químicos, seu uso não garante que professores e estudantes estejam imunes a dificuldades de compreensão, uma vez que os fenômenos científicos e suas representações intrinsecamente apresentam desafios significativos. Os conhecimentos químicos “são altamente complexos, compreendendo muitos componentes, níveis micro e macro com interações explícitas ou implícitas dentro e entre eles, são concretos ou abstratos, ou são entidades dinâmicas ou estáticas” (Eilam; Gilbert, 2014, p. 4, tradução nossa).

Nesse sentido, diante das especificidades do ensino e aprendizagem de química, as estratégias didáticas precisam estar alinhadas para que professor e estudante desenvolvam competências e habilidades relativas às representações, tendo em vista que “para desenvolver as competências representacionais dos alunos, os próprios professores têm que ser fluentes,

proficientes e eficientes no uso dessas representações” (Eilam; Gilbert, 2014, p. 4, tradução nossa).

A geometria molecular faz parte dos saberes químicos que requisitam competências representacionais para serem compreendidos (Silva; Fonseca, 2021). No âmbito das estratégias educacionais que envolvem tecnologias digitais para melhorar a visualização de moléculas, surgiu uma oportunidade para examinar se a tecnologia de realidade aumentada (que apresenta moléculas em 3D em movimento) contribui para o desenvolvimento de habilidades espaciais em comparação com os modelos moleculares 3D estáticos. Esse tipo de pesquisa é importante para enfatizar as limitações e potencialidades de recursos tecnológicos digitais na aprendizagem de química.

Portanto, o objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito da aplicação de mapa conceitual com representações moleculares em realidade aumentada na aprendizagem de geometria molecular. A hipótese foi que o mapa conceitual com realidade aumentada favorece a percepção espacial dos estudantes do grupo B para a construção de moléculas físicas com bolas de isopor e palitos. Respostas à questão de pesquisa “a percepção espacial de geometria molecular é mais eficaz com a visualização de moléculas em realidade aumentada, em comparação com moléculas 3D estáticas?” sugerem que o trabalho com múltiplas representações e, em especial, com a tecnologia de realidade aumentada, pode favorecer a percepção espacial de representações moleculares.

#### **4.2.2 As representações visuais em química**

Pesquisadores sugerem que as estratégias didáticas envolvendo representações devem considerar os diferentes níveis do conhecimento químico, isto é, os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico que circundam tais saberes (Marson; Torres, 2011). Lin, Son e Rudd II (2016) adaptaram a tríade de Johnstone (1993) a partir das noções de concretude-abstração de Justi, Gilbert e Ferreira (2009), resultando em um modelo que estabelece relações de concretude entre os níveis do conhecimento químico (macroscópico, submicroscópico e simbólico).

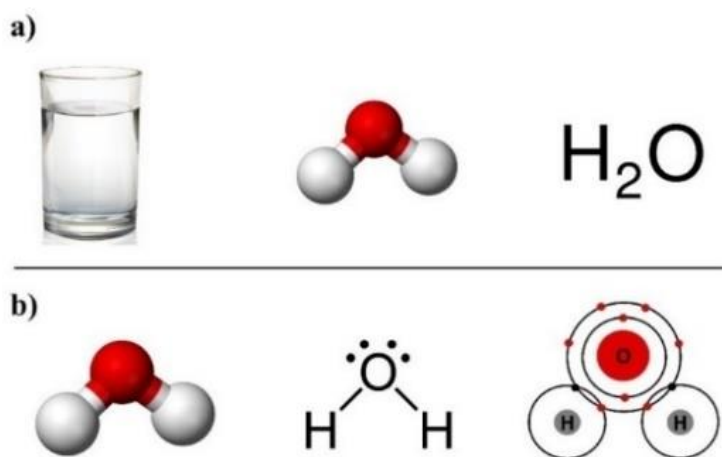
Dessa forma, os fenômenos correspondentes ao nível macroscópico são considerados mais concretos, ou seja, podem ser observados e interpretados mais intuitivamente. Por outro lado, os conhecimentos que requisitam a interpretação de simbologias são mais abstratos. O modelo em questão traz importantes reflexões para o desenvolvimento de materiais instrucionais baseados em representações visuais. Por exemplo, os conceitos de geometria

molecular podem ser estudados a partir de um fenômeno mais concreto, como a interação dos estudantes com a essência e sabor de diferentes substâncias (Silva; Fonseca, 2021), progredindo para um nível mais abstrato, quando as moléculas e suas disposições espaciais são levadas em conta para justificar as propriedades físicas e químicas das substâncias. Com isso, sem se preocupar com a ordem baseada em níveis de concretude (concreto-abstrato ou abstrato-concreto), professores podem navegar pela tríade e escolher as estratégias de ensino mais apropriadas (Lin; Son; Rudd II, 2016).

As transições que ocorrem de um nível do conhecimento químico ao outro requisitam a utilização de diferentes tipos de representações visuais. É possível representar o conhecimento por meio de modelo, gráfico, animação, vídeo, texto, figura em duas ou três dimensões. A operacionalização de representações visuais dentro dos três níveis do conhecimento químico requer a aquisição e uso do que Gilbert (2007) chamou de habilidade metavisual. Essa habilidade metacognitiva precisa ser desenvolvida por estudantes de ciências para que a compreensão dos fenômenos da natureza seja alcançada por meio de múltiplas representações (Justi; Gilbert; Ferreira, 2009). Portanto, a prática com representações diversas favorece o desenvolvimento dessa habilidade.

As múltiplas representações compõem um conjunto de estratégias visuais com a finalidade de transpor conhecimentos relevantes de maneira menos dispendiosa (Martina, 2017). Cabe destacar que além da possibilidade de utilizar múltiplas representações na transição de um conhecimento mais concreto a outro mais abstrato, diferentes representações de um mesmo objeto de ensino podem ser utilizadas para explicar um mesmo conceito ou conceitos complementares (Figura 21).

Figura 21 – a) diferentes representações da água b) diferentes representações da geometria molecular



Fonte: Os autores.

A Figura 21 mostra duas possibilidades de utilização de múltiplas representações. No primeiro caso (Figura 21a), diferentes representações são empregadas conforme o desvanecimento da concretude, em que a compreensão de um determinado conceito – representações da água nos níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico – parte de uma situação mais concreta e termina em uma mais abstrata.

No segundo caso (Figura 21b), verifica-se múltiplas representações com o objetivo de indicar a geometria angular da molécula da água. Nota-se que a partir de cada representação é possível adquirir diferentes compreensões acerca da geometria molecular da água. Dessa forma, a primeira molécula é mais simples e tende a passar o entendimento de que os átomos são esféricos, estão ligados uns aos outros e têm uma disposição espacial característica; a segunda molécula atribui aos pares de elétrons não ligantes do oxigênio a função de dimensionar a molécula para uma geometria angular; a terceira molécula, por sua vez, traz conceitos complementares no sentido de explicar a ocorrência da estabilidade da molécula a partir das ligações com compartilhamento de elétrons, além de transmitir a ideia de átomos esféricos e geometria angular.

Que problema, dentre vários possíveis, pode ser identificado na representação da Figura 21b? A terceira molécula pode levar a erros conceituais importantes, uma vez que a disposição angular da água pode ser associada erroneamente pelos estudantes à forma como os elétrons foram compartilhados na figura, o que não corresponderia à noção de repulsão eletrônica. Fato é que os especialistas (professores, pesquisadores) podem não considerar essa possibilidade de compreensão pelos estudantes porque o seu conhecimento ou competência representacional se distancia da realidade dos estudantes. Dessa forma, uma representação pode ser tão óbvia e compreensível para um especialista, mas confusa e complexa para um estudante iniciante (Gobert, 2005).

Podemos compreender essa noção de percepção do especialista e do iniciante a partir da noção apresentada por Martina (2017), quando categorizou processos envolvidos na aprendizagem com múltiplas representações visuais (Quadro 12). Para a autora, com treinamento, um sujeito pode alcançar a fluência visual, que lhe dará competências representacionais para a compreensão de conceitos científicos.

Quadro 8 – Visão geral dos processos envolvidos na aprendizagem com múltiplas representações visuais e competências resultantes

Escopo	Processo de aprendizagem representacional	Competências representacionais
Representações visuais individuais	Mediado verbalmente, processo de aprendizagem conceitual	Compreensão visual
	Não verbal, processo de aprendizagem perceptual	Fluência visual
Representações visuais múltiplas	Mediado verbalmente, processo de aprendizagem conceitual	Compreensão conexional
	Não verbal, processo de aprendizagem perceptual	Fluência conexional

Fonte: Martina (2017) *apud* Silva (2018).

Segundo Martina (2017), o processo de aprendizagem representacional pode ou não pode ser mediado verbalmente. O processo verbal está associado à aprendizagem conceitual, enquanto o não verbal à aprendizagem perceptual. Quando se trata de representações visuais individuais, a competência de compreensão visual corresponde unicamente à compreensão conceitual envolvida na representação. Um estudante olhando para uma representação da molécula da água em três dimensões (representação visual individual), por exemplo, pode compreender a partir da mediação verbal (instruções em sala de aula) que a molécula de água possui um oxigênio, dois hidrogênios (compreensão visual) e uma geometria angular. Ou seja, toda vez que o estudante pensar na molécula de água, ele a imaginará em formato angular (fluência visual).

Por outro lado, quando se trata de múltiplas representações, conforme mostrado na Figura 1b, o estudante precisa passar por um processo de aquisição de conhecimentos mediados verbalmente que justifiquem as diferenças, similaridades e complementariedades dos conceitos envolvidos nas múltiplas representações. A partir do entendimento conceitual das representações e de como elas se relacionam se chega à compreensão conexional. A fluência conexional, por sua vez, é alcançada quando a aprendizagem perceptual permite fazer a transição conceitual entre as representações visuais de forma menos dispendiosa.

Martina (2017) reitera que o esforço cognitivo empreendido nas fases iniciais do desenvolvimento de competências representacionais é maior do que quando a fluência é alcançada. Isso sugere que um especialista que chegou à fluência conexional transita entre diferentes tipos de representações visuais de forma mais automática do que àquele que está aprendendo. No entanto, vale ressaltar que a fluência se dá com tempo e treino de representações variadas (Wright *et al.*, 2008).

### 4.2.3 Metodologia

Conduziu-se uma pesquisa quantitativa, a partir da coleta e análise de dados empíricos de uma atividade de intervenção didática. Cinquenta e cinco estudantes – faixa etária dos 16 aos 22 anos – de um curso de graduação de uma universidade pública participaram voluntariamente da pesquisa. Separou-se aleatoriamente os estudantes em dois grupos (A e B), os quais participaram da atividade de intervenção no mesmo dia, mas em momentos diferentes. Somente os estudantes do grupo B acessaram um link no *MOODLE* para a instalação do aplicativo educacional de realidade aumentada, desenvolvido especialmente para este estudo. Para as análises quantitativas, utilizou-se o *IBM Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 22)*.

A aplicação dos instrumentos para a coleta e análise de dados ocorreu conforme as etapas a seguir:

- a) A cada estudante dos grupos A e B foi solicitado que respondessem a um pré-teste (Apêndice C) sobre geometria molecular (40 min.).
- b) A cada estudante dos grupos A e B foi entregue um mapa conceitual com lacunas a serem preenchidas (Apêndice D), conforme o comando “Desenhe a estrutura de Lewis dentro do quadrado para cada molécula”, “leia o mapa conceitual e verifique se o desenho que você fez mostra corretamente o que se diz sobre pares de elétrons ligantes e não ligantes” (20 min.).
- c) A cada estudante dos grupos A e B foi entregue um mapa conceitual com as lacunas preenchidas (Apêndice E), por meio do qual eles analisaram e corrigiram a tarefa anterior (15 min.).
- d) A cada estudante do grupo A foi entregue um mapa conceitual com moléculas 3D estáticas (Apêndice F), por meio do qual foi respondido o comando “analise cada molécula em 3D, comparando-a com a estrutura de Lewis da tarefa anterior, fazendo anotações que achar pertinente” (15 min.).
- e) A cada estudante do grupo B foi entregue um mapa conceitual com alvos de moléculas que surgiram com a tecnologia de realidade aumentada, ao apontar o smartphone (Apêndice G), por meio do qual foi respondido o comando “analise cada molécula em realidade aumentada, comparando-a com a estrutura de Lewis da tarefa anterior, fazendo anotações que achar pertinente” (15 min.).
- f) A cada estudante dos grupos A e B foi entregue um pós-teste (Apêndice H) sobre geometria molecular (30 min.).

Apresentou-se as etapas da pesquisa e enfatizou-se acerca dos objetivos, riscos e benefícios, conforme o projeto aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Humanos e o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) assinado pelos participantes (Apêndice A).

#### 4.2.3.1 Instrumentos de intervenção didática e coleta de dados

Um pré-teste (alfa de *Cronbach* 0,71) e pós-teste (alfa de *Cronbach* 0,81) sobre geometria molecular foram elaborados para analisar o desempenho dos estudantes quanto à geometria das moléculas, antes e depois da intervenção didática. A consistência interna dos testes foi adequada para as finalidades da pesquisa.

Como parte do pós-teste, conduziu-se uma tarefa prática de construção de moléculas físicas, que foi avaliada separadamente. Assim, o pós-teste foi aplicado no final das atividades para verificar: a) se houve diferença no desempenho quanto à geometria das moléculas; b) o efeito da realidade aumentada no desempenho na tarefa de construção de moléculas físicas.

Um conjunto de mapas conceituais foi elaborado para servir de instrumento da intervenção didática e coleta de dados. Considerando que todos os estudantes haviam cursado o Ensino Médio e estudado o conteúdo de geometria molecular, optou-se por intervir no nível de mediação – com materiais autoinstrucionais – para, inicialmente, promover uma revisão do conteúdo e, finalmente, verificar o impacto da instrução na percepção espacial dos estudantes.

Em conformidade com princípios de aprendizagem mediada por mapas conceituais (Silva; Fonseca; Correia, 2020), elaborou-se – para efeito de revisão de conteúdo – um mapa conceitual com lacunas (Apêndice D) e mapa com figuras (Apêndices E e F). A diferença na aplicação dos instrumentos entre os grupos comparação (A) e experimental (B) consistiu em apresentar um mapa conceitual com moléculas tridimensionais estáticas para o grupo A (Apêndice F) e um mapa conceitual com moléculas tridimensionais-dinâmicas com realidade aumentada para o grupo B (Apêndice G).

#### 4.2.3.2 Organização dos dados e métodos de análise

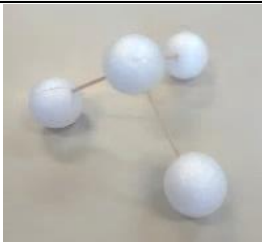


Preliminarmente, realizou-se uma análise descritiva para verificar se houve diferença no desempenho dos estudantes quanto à geometria das moléculas, a partir da comparação entre o pré-teste e pós-teste. Essa análise genérica levou em consideração todas as questões dos

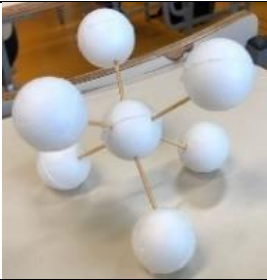



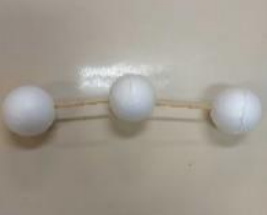
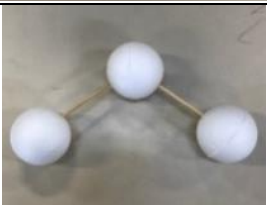
respectivos testes. No entanto, a avaliação dos efeitos da utilização do mapa conceitual em realidade aumentada no aprimoramento da percepção espacial dos estudantes foi conduzida por meio de uma tarefa de construção de moléculas físicas utilizando bolas de isopor e palitos de churrasco. Esta avaliação foi realizada durante o pós-teste, com base nas seguintes instruções: “Pegue 7 bolas de isopor e 8 palitos com o pesquisador. Construa as moléculas  $\text{PCl}_3$  e  $\text{BeH}_2$ . Tire foto de cada uma. Desmonte-as e com o mesmo material construa a molécula  $\text{SF}_6$ . Tire foto de cada molécula e envie as 3 fotos pelo *MOODLE*”.

Especialmente a tarefa supracitada foi selecionada para avaliar os efeitos da realidade aumentada por se tratar de uma estratégia concreta para inferir se o resultado da molécula construída pelos estudantes depende de outras representações visualizadas/manipuladas por eles (representação 3D estática ou em realidade aumentada). Isso porque o objetivo de aprendizagem avaliado na referida questão tem relação com a percepção espacial. E uma das formas de examinar a percepção espacial é a partir da construção de moléculas físicas como bolas de isopor e palitos de churrasco. Essa estratégia de verificação dos efeitos de representações nas construções de moléculas foi inspirada na seção de tarefas de “percepção e transferência mental de informações” da pesquisa de Ferk *et al.* (2003).

Dessa forma, avaliou-se as disposições espaciais dos átomos nas três moléculas construídas pelos estudantes, conforme os seguintes critérios de pontuação (Quadro 13):

Quadro 9 – Exemplos de moléculas construídas pelos estudantes e pontuação obtida

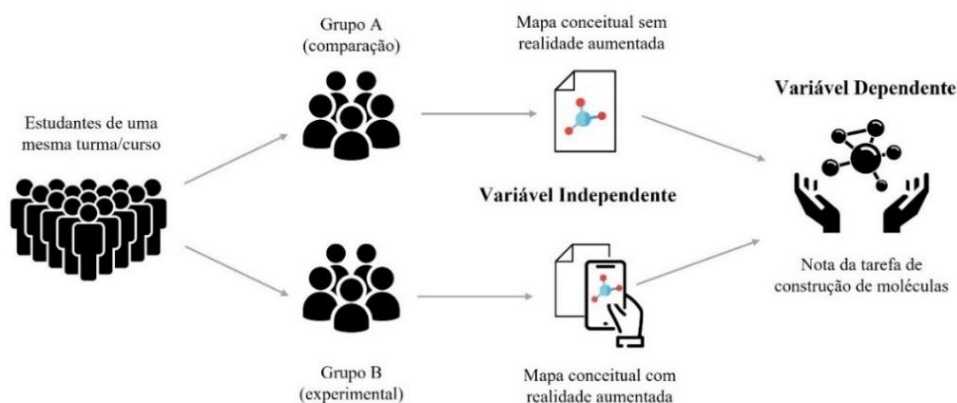
Foto	Molécula	Disposição espacial (pontuação)
	$\text{PCl}_3$	Apropriada (2,0)
	$\text{PCl}_3$	Inapropriada (1,0)
	$\text{PCl}_3$	Incorreta (0,0)

	$SF_6$	Apropriada (2,0)
	$SF_6$	Inapropriada (1,0)
	$SF_6$	Incorreta (0,0)
	$BeH_2$	Apropriada (2,0)
	$BeH_2$	Inapropriada (1,0)
	$BeH_2$	Incorreta (0,0)

Fonte: A pesquisa.

Para verificar se o desempenho na atividade de construção de moléculas físicas dependeu dos conhecimentos prévios dos estudantes, realizou-se uma comparação de médias (teste *t* independente) entre os grupos A e B. Dessa forma, o pré-teste (conhecimentos prévios) foi tratado como possível covariável (Figura 22).

Figura 22 – Design experimental para avaliar a percepção espacial dos estudantes



Fonte: Os autores.

Quando a interferência da possível covariável (conhecimentos prévios) foi descartada, empregou-se o teste  $t$  para analisar se houve diferença significativa entre os grupos A (sem realidade aumentada) e B (com realidade aumentada).

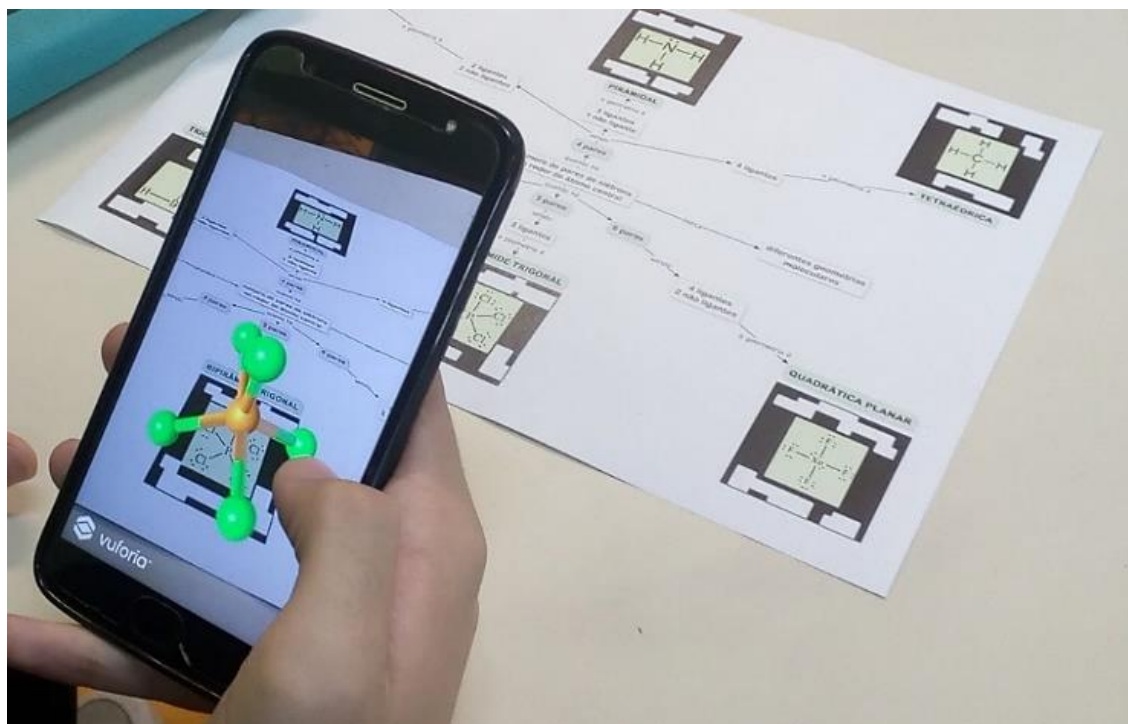
#### 4.2.3.3 O desenvolvimento do aplicativo de realidade aumentada

A tecnologia de Realidade Aumentada (RA) é o processo de sobrepor imagens geradas por computador ao ambiente do mundo real. É crucial destacar que o termo RA não implica necessariamente que os objetos virtuais reproduzam fielmente a realidade. No caso do aplicativo desenvolvido, ao direcionar a câmera do celular para um dos seis alvos do mapa conceitual impresso, uma representação da molécula com a estrutura correspondente surge em 3D rotacionando “sobre” a representação 2D estática.

O mapa conceitual é um organizador gráfico da estrutura do conhecimento, em que revela conceitos e termos de ligação em forma de proposições. Essa ferramenta pode ser utilizada para representar o conhecimento a ser apreciado pelo público interessado, em uma tentativa de sintetizar informações importantes para a aprendizagem (Silva, Fonseca, Correia, 2020). Portanto, o aspecto inovador da criação do aplicativo foi a integração da tecnologia de realidade aumentada a um mapa conceitual impresso, para a aprendizagem de geometria molecular por meio de múltiplas representações (2D e 3D).

A atividade pedagógica se dá por meio da interação entre o estudante portando um smartphone e um mapa conceitual impresso, contendo os alvos a serem decodificados pelo aplicativo (Figura 23).

Figura 23 – Demonstração da interação do estudante com o mapa conceitual por meio de um aplicativo de realidade aumentada



Fonte: A pesquisa.

A estrutura do aplicativo compreende recursos de aplicativos gratuitos: *Unity 3D* para o desenvolvimento do aplicativo final; *Jmol* para a exportação dos objetos (moléculas) no formato OBJ; *CmapTools* para a elaboração do mapa conceitual. Além disso, o *Vuforia* foi utilizado como mecanismo de implantação dos recursos de RA.

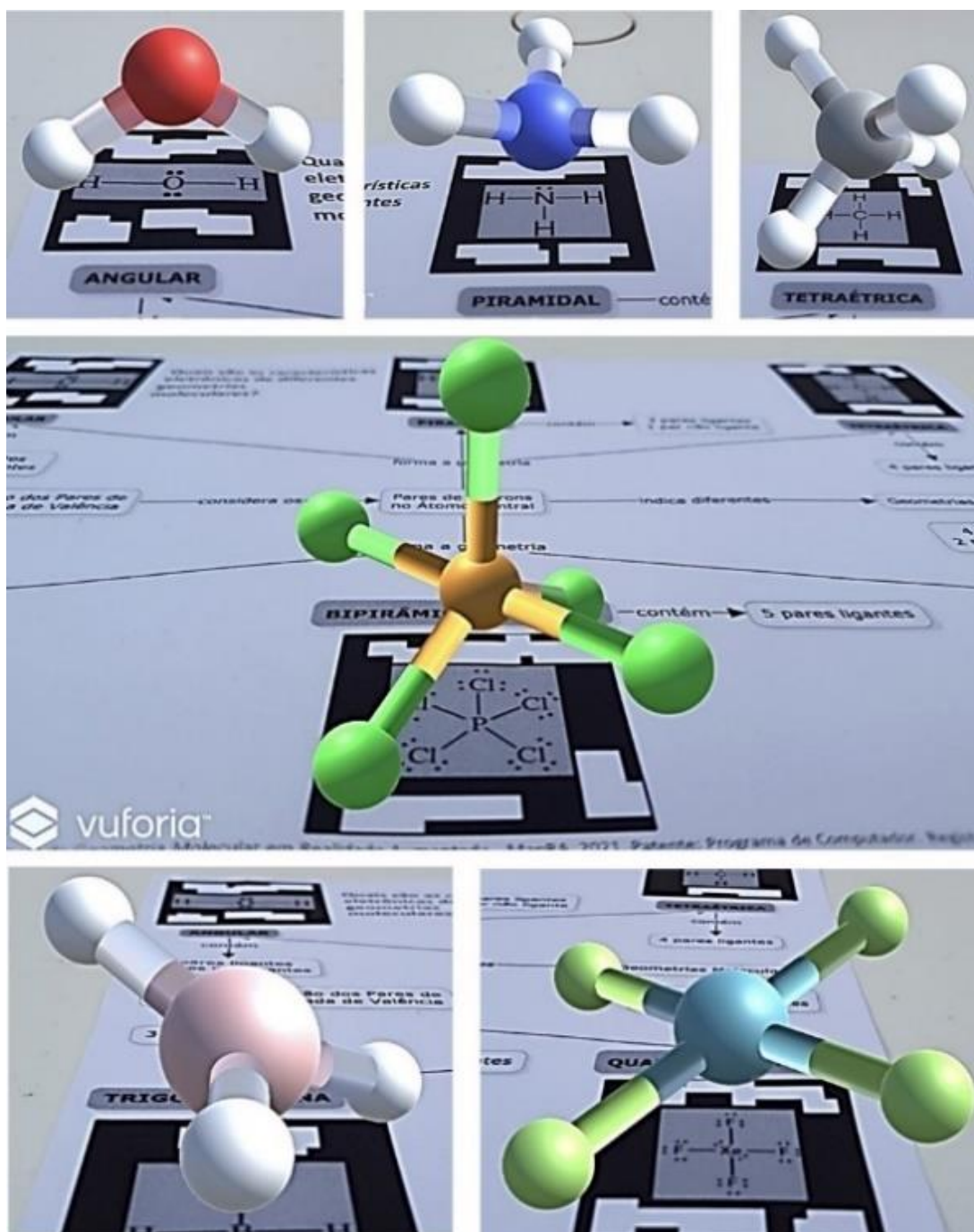
Um mapa conceitual sobre geometria molecular foi elaborado a partir do aplicativo *CmapTools*. A integração dos conceitos do mapa conceitual auxilia na busca por respostas da seguinte pergunta focal feita aos estudantes: quais são as características eletrônicas de diferentes geometrias moleculares? Há seis exemplos de geometrias moleculares para os estudantes explorarem as características eletrônicas e visualizarem os efeitos da repulsão eletrônica por meio de animações 3D. As figuras/representações são os próprios alvos do mecanismo de realidade aumentada e foram formatadas com padrões preto e branco distintos para efeito de captura pelo dispositivo (smartphone).

O aplicativo *Jmol* (<http://jmol.sourceforge.net/>) foi executado no *Windows* para a visualização e exportação das moléculas de água, amônia, metano, borano, pentacloreto de fósforo e tetrafluoreto de xenônio. *Jmol* é um visualizador de código aberto gratuito de estruturas moleculares, útil para estudantes, educadores e pesquisadores em química, bioquímica e outros campos que lidam com estrutura molecular.

As referidas moléculas foram exportadas no formato “.obj” e tratadas no aplicativo de desenvolvimento de games *Unity 3D*. As figuras-alvo (seis moléculas) foram registradas no *Vuforia* (<https://developer.vuforia.com/>), de onde foram exportados os acessórios (*unity package*) para o desenvolvimento do aplicativo no *Unity 3D*.

Após o desenvolvimento no *Unity 3D* (<https://unity.com/>), salvou-se o aplicativo no formato “.APK”. A Figura 24 mostra todas as moléculas que o aplicativo pode revelar.

Figura 24 – Demonstração de todas as moléculas que o aplicativo de realidade aumentada pode revelar.



Fonte: Os autores.

#### 4.2.4 Resultados e discussão

A fim de testar a hipótese de que o grupo de estudantes que interagiu com o mapa conceitual com realidade aumentada obtém maior desempenho na tarefa de construção de moléculas físicas, comparou-se as notas do grupo A (sem realidade aumentada) e grupo B (com realidade aumentada). Inicialmente, verificou-se se os conhecimentos prévios atuaram significativamente no desempenho na tarefa de construção de moléculas físicas. Para isso, utilizou-se os resultados do pré-teste para efeito de comparação de médias entre os dois grupos (Tabela 3).

Tabela 3 – Comparação de médias entre os grupos A (sem realidade aumentada) e B (com realidade aumentada)

	Grupos	<i>n</i>	Média	Desvio Padrão
Pré-teste	Sem RA	26	5,13	2,15
	Com RA	29	5,34	1,76

Fonte: Os autores.

Para o resultado do pré-teste, o teste *t* independente mostrou que não há diferença significativa entre os grupos baseada nos conhecimentos prévios dos estudantes ( $t(53) = -0,394$ ;  $p > 0,05$ ). Dessa forma, conclui-se que o fator testado não interferiu no desempenho da tarefa de construção de moléculas físicas.

Os resultados do pós-teste (conhecimentos prévios de geometria molecular) revelaram que não há diferença significativa entre os dois grupos (A e B). A nota média obtida no pós-teste foi de 8,2 com desvio de  $\pm 1,2$ . Em geral, nota-se que o desempenho dos estudantes foi satisfatório. Esse resultado valida a eficiência do conjunto de estratégias e recursos empregados na intervenção didática. Verifica-se uma homogeneidade nas notas, comprovando que os objetivos de aprendizagem foram alcançados. Porém, quando a atividade de construção de moléculas físicas contida no pós-teste foi avaliada separadamente, uma diferença importante entre os grupos foi observada (Tabela 4).

Tabela 4 – Comparação de médias entre os grupos A (sem realidade aumentada) e B (com realidade aumentada)

	Grupos	<i>n</i>	Média	Desvio Padrão
Tarefa de Construção de Moléculas Físicas	Sem RA	26	6,92	2,29
	Com RA	29	8,62	1,95

Fonte: Os autores.

Em relação à tarefa de construção de moléculas físicas, o teste *t* independente mostrou que há diferença significativa entre os grupos baseada na percepção espacial dos estudantes

( $t(53) = -2,971$ ;  $p < 0,05$ ). Dessa forma, aceita-se a hipótese de que o mapa conceitual com realidade aumentada favoreceu a percepção espacial dos estudantes do grupo B para a construção de moléculas físicas. A diferença não significativa entre os grupos A e B referente ao teste de conhecimentos prévios (pré-teste) reforça que a atividade com realidade aumentada influenciou somente no desempenho da tarefa de construção de moléculas físicas.

Mas o que levou os estudantes com realidade aumentada a ter melhor desempenho? As evidências deste estudo nos levam a inferir que há, pelo menos, três explicações que se complementam. Primeiro, o engajamento emocional é um fator crucial no processo de aprendizado. A RA cria um ambiente mais imersivo e estimulante para os estudantes, que se sentem mais envolvidos na atividade. Isso pode ser atribuído à novidade e à natureza interativa da tecnologia. Quando os alunos se sentem emocionalmente envolvidos, eles têm maior probabilidade de prestar atenção e de se dedicar ao aprendizado. Chen, Huang, Chou (2019) e Chou *et al.* (2022) também desenvolveram aplicativos de realidade aumentada com mapa conceitual para ensinar ciências e destacaram o papel motivacional da tecnologia. Na mesma linha, Chen e Liu (2020) mostraram que a utilização de realidade aumentada no ensino de química serve como uma estratégia promissora para motivar os estudantes.

Segundo, a animação presente nas moléculas em RA é um elemento que cativa os estudantes. As representações tridimensionais em movimento proporcionam uma compreensão mais profunda e intuitiva dos conceitos químicos. Isso está de acordo com os achados de Korakakis *et al.* (2009), que apontaram que animações tridimensionais são mais atraentes para os alunos. A capacidade de visualizar as moléculas em diferentes ângulos e observar suas interações dinâmicas pode facilitar a compreensão dos conceitos químicos de maneira mais eficaz.

Terceiro, a utilização da RA para apresentar moléculas tridimensionais em movimento, sobrepondo-as a representações moleculares em duas dimensões, ajuda a reduzir o efeito da atenção dividida. O efeito da atenção dividida ocorre quando as informações relevantes estão dispersas no espaço, tornando difícil para os estudantes assimilarem e processarem essas informações simultaneamente (Pouw *et al.*, 2019). A RA proporciona uma integração mais coesa e contextualizada das informações, tornando o processo de aprendizado mais fluido e menos sujeito a distrações. Por exemplo, o grupo A precisou comparar as duas representações a partir de duas fontes diferentes e separadas uma da outra, o que pode ter aumentado a carga cognitiva em função da necessidade de integrar mentalmente informações de múltiplas fontes.

Vale ressaltar, no entanto, que a representação 3D estática utilizada pelo grupo A não deve ser considerada ineficaz. Korakakis *et al.* (2009) reiteram que as representações 3D estáticas também são importantes, pois dão liberdade para os estudantes decidirem quando e como interagir com elas. No caso específico do presente estudo, em se tratando de habilidades espaciais para construir moléculas físicas, as representações moleculares dinâmicas (em realidade aumentada) foram mais eficazes.

Essas três explicações se complementam e mostram como a RA pode ser uma ferramenta valiosa no ensino de química, melhorando o engajamento dos alunos, facilitando a compreensão dos conceitos e otimizando a maneira como as informações são apresentadas e processadas. Portanto, a integração da RA no ensino de química tem o potencial de melhorar significativamente a qualidade da educação nessa disciplina.

A elaboração, implementação e avaliação da intervenção didática do presente estudo estão alinhadas com os princípios da aprendizagem mediada por mapas conceituais (Silva, Fonseca, Correia, 2020), concretude (Lin; Son; Rudd II, 2016) e múltiplas representações (Martina, 2017).

O gerenciamento da carga extrínseca associada à instrução se mostrou eficaz e evitou a sobrecarga cognitiva dos estudantes durante as atividades. A revisão do conteúdo de geometria molecular mediada por mapas conceituais com lacunas e com figuras foi satisfatória e contou estrategicamente com os efeitos da imaginação (Leahy; Sweller, 2008) e do exemplo trabalhado (Kalyuga *et al.*, 2003). No primeiro caso, mapas com lacunas foram pensados para que os estudantes pudessem imaginar e recuperar informações da memória de longo prazo para desenhar as estruturas de Lewis. Em seguida, outro mapa conceitual contendo as respostas foi disponibilizado para que os estudantes entendessem o processo de construção das estruturas de Lewis e pudessem aprender por meio de uma espécie de exemplo trabalhado. Desse modo, o bom desempenho dos estudantes comprova que as estratégias teórico-metodológicas empregadas na intervenção didática foram significativas.

O uso de diferentes representações moleculares, como a estrutura de Lewis e modelos de bolas e varetas, partiu da necessidade de trabalhar com diferentes níveis de concretude. A química lida com fenômenos que ocorrem em escalas macroscópicas, simbólicas e submicroscópica (Lin; Son; Rudd II, 2016). Portanto, oferecer aos estudantes uma variedade de representações ajuda a conectá-los a esses diferentes níveis de realidade química. A estrutura de Lewis, por exemplo, é uma representação simbólica que ajuda os estudantes a

compreenderem a distribuição de elétrons, enquanto modelos de bolas e varetas proporcionam uma visão tridimensional das moléculas.

A abordagem de usar múltiplas representações moleculares permite que os estudantes transitem entre diferentes formas de visualização. Isso é fundamental para o desenvolvimento de competências representacionais, que vão desde a compreensão visual até a fluência conexional (Martina, 2017). Ao trabalhar com várias representações, os alunos aprendem a traduzir informações de uma forma para outra, relacionando conceitos químicos de maneira mais completa. Essa habilidade de transitar entre representações fortalece a compreensão conceitual e a capacidade de comunicar eficazmente ideias químicas complexas.

#### **4.2.5 Considerações finais**

O resultado positivo da intervenção didática mostra que o conjunto de estratégias aponta para a promoção do desenvolvimento de competências representacionais, principalmente se o recurso de realidade aumentada for empregado. Aceitou-se a hipótese de que o mapa conceitual com moléculas em realidade aumentada favoreceu a percepção espacial dos estudantes do grupo B para a construção de moléculas físicas tridimensionais.

Em suma, os resultados sugerem que o desempenho superior do grupo B pode ter sido influenciado por fatores emocionais e de atenção, além da interação com as moléculas em movimento na realidade aumentada, embora essas suposições não tenham sido diretamente comprovadas pela pesquisa principal. É importante destacar que, devido à necessidade de treinamento constante, não se pode precisar o desenvolvimento de competências representacionais neste estudo, mas revelar indícios da contribuição da estratégia conduzida para o aumento da percepção de moléculas tridimensionais e, conseqüentemente, estágios iniciais do desenvolvimento de habilidades espaciais. Ressalta-se que o foco da presente pesquisa foi explorar a percepção espacial de moléculas estáticas e em movimento (realidade aumentada) enquanto possível lacuna da área de ensino de geometria molecular.

Por fim, a integração do recurso de realidade aumentada ao mapa conceitual revelou uma vantagem sobre o mapa conceitual com representações moleculares estáticas. Embora o desempenho em termos conceituais tenha sido satisfatório em ambos os grupos, o grupo B transferiu os conhecimentos adquiridos a partir da manipulação de moléculas com o aplicativo de RA com maior precisão durante a atividade de construção de moléculas físicas. Com isso, o produto educacional se torna um recurso potencialmente significativo para auxiliar na

conceitualização (mapa conceitual) e desenvolvimento de habilidades espaciais (representação molecular 3D dinâmica).

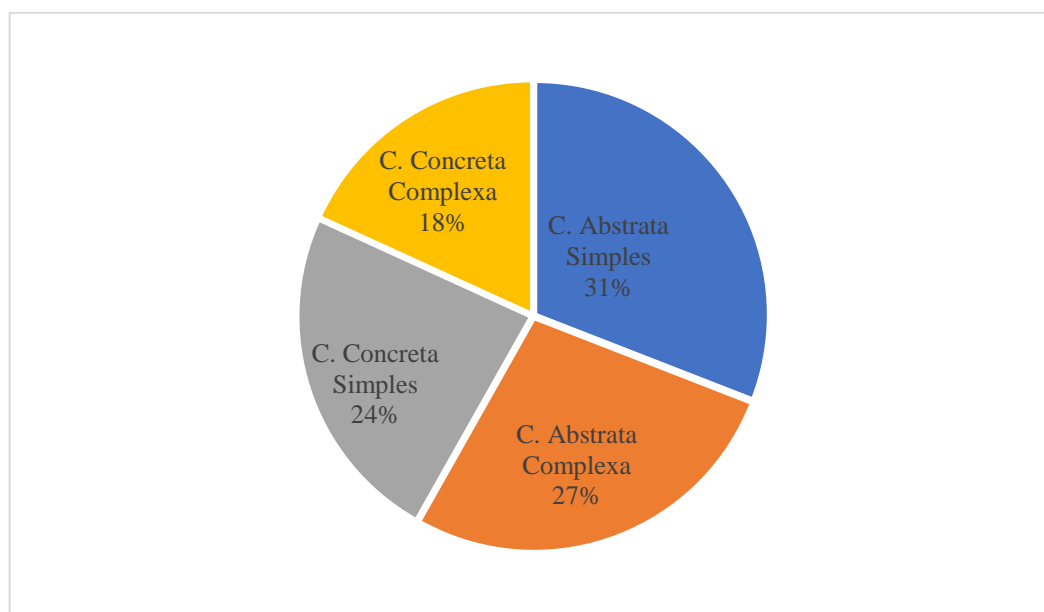
#### 4.2.6 Análise complementar: perspectivas dos estudantes acerca da importância do estudo da geometria molecular<sup>12</sup>

Mais importante do que compreender as teorias por trás da conformação das moléculas é ser capaz de transferir os conhecimentos adquiridos para contextos reais de aplicação. Em outras palavras, os estudantes precisam ser incentivados a prever e analisar o comportamento das substâncias a partir das suas estruturas.

Nesse contexto, uma análise complementar foi conduzida para investigar a concepção dos estudantes acerca da importância do estudo da geometria molecular. Para isso, a questão 13 do pós-teste do estudo II, foi examinada para verificar se os estudantes que revisaram o conteúdo em seus aspectos conceituais e espaciais necessariamente têm consciência da sua importância e aplicação.

A noção de concretude foi empregada para classificar as respostas em quatro grupos (Figura 25): a) Concepção abstrata com uma linguagem simples ( $n=17$ ); b) Concepção abstrata com uma linguagem complexa ( $n=15$ ); c) Concepção concreta com uma linguagem simples ( $n=13$ ); d) Concepção concreta com uma linguagem complexa ( $n=10$ ).

Figura 25 – Concepções sobre a importância da geometria molecular



Fonte: Os autores.

<sup>12</sup> Esta análise complementar não foi adicionada ao artigo científico publicado referente ao estudo II.

Verificou-se que 58% dos estudantes se expressaram de forma mais abstrata, por meio de uma linguagem que variou de simples a complexa. O grupo dominante foi o de “concepção abstrata com uma linguagem simples” (31%), revelando-se enquanto principal perspectiva dos estudantes frente ao questionamento “qual é a importância do estudo da geometria molecular?”.

No entanto, nota-se que um percentual considerável de respondentes ocupou cada grupo. O grupo “concepção abstrata com uma linguagem simples” (31%) representa concepções genéricas e simplificadas acerca do tema proposto (Quadro 14). Ou seja, as concepções aparecem de forma limitada e não permite descobrir se os estudantes de fato conseguem relacionar estrutura e propriedade para compreender os fenômenos químicos.

Quadro 10 – Exemplos das respostas apresentadas

Respostas dissertativas de três estudantes
- “O estudo da geometria molecular é importante para o conhecimento das interações entre moléculas”.
- “É importante para entender o comportamento das moléculas e suas interações”.
- “Para entender o comportamento das moléculas e o espaço que ocupam”.

Fonte: Os autores.

O grupo “concepção abstrata com uma linguagem complexa” (27%) representa concepções genéricas, porém mais complexas acerca do tema proposto (Quadro 15). A partir das concepções é possível identificar que os estudantes fazem relação entre a estrutura e propriedade, ainda que não cite a propriedade ou exemplos de aplicação.

Quadro 11 – Exemplos das respostas apresentadas

Respostas dissertativas de três estudantes
- “A geometria molecular é importante devido a inúmeros fatores entre eles o estudo das propriedades físico-químicas de moléculas do estudo de reações”.
- “O modo como os átomos estão ligados em uma molécula interfere nas propriedades químicas e reativas de um composto”.
- “O estudo da geometria molecular espacial é importante pois o arranjo dos átomos da molécula define suas características físico-químicas”.

Fonte: Os autores.

O grupo “concepção concreta com uma linguagem simples” (24%) representa concepções por meio de uma linguagem simplificada, porém contextual, demonstrando conhecimento de características mais específicas das substâncias influenciadas pela geometria molecular (Quadro 16).

Quadro 12 – Exemplos das respostas apresentadas

Respostas dissertativas de três estudantes
- “A geometria molecular determina importantes características da molécula como por exemplo sua polaridade”.
- “Por meio da geometria molecular é possível explicar fenômenos como a não miscibilidade da água no óleo assim como a construção de poliedros”.
- “A geometria molecular é importante para saber previamente a forma da molécula e suas características de acordo com sua polaridade para combinar moléculas entre si”.

Fonte: Os autores.

O grupo “concepção concreta com uma linguagem complexa” (18%) representa concepções mais rebuscadas e contextualizadas, demonstrando conhecimento de características mais específicas das substâncias influenciadas pela geometria molecular (Quadro 17).

Quadro 13 – Exemplos das respostas apresentadas

Respostas dissertativas de três estudantes
- “A geometria molecular é importante para se entender certas atrações e repulsões entre átomos e moléculas que resulta em diferentes ligações e estruturas com diferentes características úteis para o ser humano por exemplo o detergente funciona por causa da geometria molecular questão da polaridade e apolaridade atração e repulsão”.
- “Através da geometria molecular é possível entender as propriedades físico-químicas das moléculas e Verificar como isso se reflete em seu comportamento no espaço um exemplo disso seria a atividade biológica de um composto que dependendo de sua conformação espacial pode ou não reagir de determinada maneira no organismo”.
- “Para estudar uma melhor efetividade de absorção de medicamentos assim como melhor reações químicas entre moléculas”.

Fonte: Os autores.

A análise das respostas permitiu identificar os grupos que legitimam as concepções dos estudantes acerca do estudo de geometria molecular. Concluiu-se que a intervenção didática contribuiu para a aquisição de vocabulário e entendimento geral do conteúdo. No entanto, a falta de especificidade quanto à aplicação dos conhecimentos para explicar fenômenos químicos pode ter levado os estudantes a expressarem seus conhecimentos de forma mais abstrata.

Dessa forma, o resultado mostra a necessidade de adequar as estratégias e recursos instrucionais para oportunizar o entendimento da geometria molecular em diferentes níveis de concretude para que os aspectos simbólicos, submicroscópico e macroscópicos sejam contemplados.

### 4.3 ESTUDO III: APRIMORANDO A APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR POR MEIO DE INTERVENÇÕES COM REALIDADE VIRTUAL: EFEITOS EM ESTUDANTES COM DIFERENTES NÍVEIS DE CONHECIMENTO PRÉVIO<sup>13</sup>

O objetivo deste estudo foi avaliar como a realidade virtual, associada a outras estratégias didáticas, pode facilitar a visualização e o entendimento de estruturas moleculares por estudantes de diferentes níveis de conhecimento prévio. Para fins avaliativos, aplicou-se um pré-teste e pós-teste com questões de múltipla escolha e espaço para justificativa. Além de uma análise estatística para verificar o ganho de aprendizagem, realizou-se uma análise qualitativa das respostas do pré-teste/pós-teste e das tarefas de visualização com realidade virtual e montagem de modelos moleculares físicos.

Os achados revelaram que todos os recursos utilizados foram importantes para o êxito da intervenção didática. Vale ressaltar, no entanto, que a experiência com realidade virtual foi avaliada pelos estudantes como a mais engajadora. As habilidades espaciais – mensuradas pelo teste de rotação mental – não foram determinantes para o desempenho nas tarefas, uma vez que não houve correlação entre o desempenho no teste de rotação mental e os conhecimentos prévios de geometria molecular. Além disso, verificou-se que a intervenção ajudou a reduzir a lacuna de conhecimento entre os participantes que tinham mais ou menos experiência no assunto.

#### 4.3.1 Introdução

Com o crescente incentivo e acesso às tecnologias digitais na educação, a aprendizagem de conceitos científicos passa por mudanças importantes. A aprendizagem de geometria molecular, por exemplo, é necessária para a compreensão da estrutura e propriedades físico-químicas das substâncias, mas pode ser desafiadora devido à sua natureza espacial (Silva, 2018). Com isso, o ensino a partir de múltiplas representações (Martina, 2017) se torna uma estratégia pedagógica essencial para o desenvolvimento de habilidades espaciais (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015).

A tecnologia de realidade virtual pode potencializar a aprendizagem de geometria molecular por meio da facilitação da visualização de estruturas moleculares tridimensionais (Nisa *et al.*, 2021; Fombona-Pascual; Fombona; Vázquez-Cano, 2022). Porém, o sucesso de

---

<sup>13</sup> O conteúdo desta seção secundária está sendo preparado para publicação em periódico científico.

tecnologias como essa no contexto educacional não é garantido sem um planejamento pedagógico adequado (Daniela, 2021). Isso quer dizer que variáveis tecnológicas e construtos psicológicos moldam a forma como o estudante percebe o material instrucional e compreende o conteúdo (Makransky; Peterson, 2021).

Pesquisas sobre a eficácia das tecnologias digitais na educação têm trazido comparações entre recursos multimídia para justificar o seu emprego em sala de aula (Buchner; Kerres, 2023). Como consequência, os resultados não têm sido consensuais, levando, em alguns casos, a generalizações inadequadas. No entanto, com o conhecimento cada vez mais amplo acerca da importância do método instrucional, Buchner e Kerres (2023) sugerem a investigação de questões sobre quando e como a aprendizagem por meio da imersão com realidade virtual funciona. Foi a partir dessa lógica que Sikl *et al.* (2024) conseguiram olhar para outras variáveis que influenciam o processo de aprendizagem com realidade virtual. Eles evidenciaram que o tipo de escola, e não o tipo de multimídia utilizado, pode influenciar significativamente os ganhos de aprendizagem.

A contribuição do presente estudo para a pesquisa existente é a comparação de estudantes com baixo e alto nível de conhecimento prévio em química, antes e após uma intervenção didática com realidade virtual. Em vez de investigar se a tecnologia é eficaz, partiu-se do pressuposto de que a operacionalização de variáveis tecnológicas e psicológicas (Makransky; Peterson, 2021) adequada pode levar à produção de material instrucional eficaz. Focalizou-se, portanto, em como estudantes com diferentes níveis de conhecimento prévio atendem ao material e compreendem o conteúdo.

Essa abordagem é pertinente para verificar as potencialidades da intervenção didática nos contextos em que o nivelamento do conhecimento é requerido para otimizar a prática educativa. Dessa forma, o estudo buscou alcançar dois objetivos específicos: avaliar o desempenho dos estudantes antes e após a intervenção didática; identificar as estratégias de resolução de tarefas adotadas pelos estudantes no ambiente de realidade virtual.

#### **4.3.2 Visualização em química e tecnologia de realidade virtual**

A necessidade de visualização em geometria molecular emerge em decorrência da natureza espacial das noções de repulsão eletrônica. Assim, a compreensão da estrutura e, conseqüentemente, da propriedade de uma molécula/substância depende da compreensão das características eletrônicas dos átomos e sua conformação espacial. A visualização de modelos

moleculares é geralmente facilitada por meio de recursos tecnológicos (Nisa *et al.*, 2021), mas os desafios impostos pelas diferentes habilidades espaciais requisitadas no processo de aprendizagem de geometria molecular tornam o ensino desse conceito um objeto de estudo recorrente.

As habilidades espaciais consistem em um conjunto de construtos mentais responsáveis pela visualização e manipulação mental de representações pictóricas (Harle; Towns, 2010). No contexto da aprendizagem de conceitos químicos, tais construtos desempenham um papel importante na capacidade de produção de representações visuais, como o desenho de estruturas moleculares, e estabelecimento de relações com suas propriedades físicas e químicas (Kozma *et al.*, 2000).

Tomando-se como base pesquisas em educação química, Carlisle, Tyson e Nieswandt (2015) destacaram quatro áreas em que habilidades espaciais são recrutadas durante a aprendizagem de química: planos simétricos, visualização de moléculas, representação e translação.

A compreensão de diferentes estruturas moleculares pode acontecer por meio da noção de simetria, visto que padrões e formas simétricas tendem a ser mais facilmente assimilados e processados mentalmente (Taagepera *et al.*, 2011). A identificação de planos de simetria em representações moleculares 2D e 3D requer que os estudantes avaliem as relações de simetria para prever, por exemplo, a polaridade da substância e, conseqüentemente, sua propriedade.

A habilidade de visualização é fundamental para que os estudantes possam estabelecer relações espaciais entre átomos dentro de uma molécula. A exposição dos estudantes a diferentes modelos moleculares contribui para o desenvolvimento de habilidades de visualização, pois oportuniza a discussão de características espaciais a partir de diferentes representações (Rahmawati; Dianhar; Arifin, 2021).

A representação, por sua vez, está relacionada com a capacidade de produzir adequadamente diferentes formas de representação, analisando-se suas características e implicações (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015). Kiernan, Manches e Seery (2021) identificaram que os estudantes empregam diferentes estratégias de representação para resolver problemas de estrutura molecular. Os autores defendem que o uso de estratégias específicas de raciocínio deveria ser promovido como abordagem pedagógica, uma vez que a utilização de métodos algorítmicos pode não ser tão preciso quanto a utilização de métodos de representação tridimensional.

Já a habilidade de translação é exercida quando os estudantes trabalham com uma variedade de representações e devem fazer associações significativas entre essas representações (Martina, 2017). Isso significa, por exemplo, que diferentes representações moleculares da água – fórmula molecular, fórmula estrutural, modelo 3D, modelo 3D com densidade eletrônica – podem expressar conceitos distintos e complementares (Silva; Correia, 2023b).

No contexto da aprendizagem aprimorada por tecnologia (Daniela, 2021), os aplicativos de realidade virtual têm desempenhado um papel importante em termos de melhoria da experiência de visualização (Brown *et al.*, 2020). Enquanto recurso visuoespacial, que integra características visuais e espaciais, a tecnologia de realidade virtual pode contribuir para a aquisição e/ou consolidação de conhecimentos científicos complexos, por meio do desenvolvimento das habilidades espaciais destacadas por Carlisle, Tyson e Nieswandt (2015).

Com a facilitação do acesso às tecnologias em sala de aula e disseminação de tutoriais de criação de aplicativos de realidade aumentada e virtual, pesquisas em educação tecnológica têm revelado potencialidades e fragilidades dessas tecnologias. Enquanto existe uma reação positiva dos estudantes ao manipular tecnologias digitais, existe também frustração ao perceber que a tecnologia não promove necessariamente ganho de aprendizagem (Mayer; Makransky; Parong, 2023). O problema apontado por Kulesza, DeHont II e Neslek (2011) é que os estudantes podem estar mais interessados na tecnologia em si, não na aprendizagem.

Na verdade, defende-se que o método instrucional se destaca em relação à mera utilização de um recurso tecnológico digital. Ou seja, um recurso pedagógico mal utilizado, proveniente de um planejamento mal concebido, pode trazer pouca ou nenhuma contribuição à aprendizagem. Essa ideia vai ao encontro com a visão de Makransky e Peterson (2021), que apresentaram um quadro teórico para descrever o processo de aprendizagem por meio da imersão com realidade virtual.

Makransky e Peterson (2021) desenvolveram um Modelo Cognitivo-Afetivo de Aprendizagem Imersiva (CAMIL – do inglês *Cognitive Affective Model of Immersive Learning*). Os autores partem do pressuposto de que a relação entre o recurso multimídia e o método pode resultar em interação, quando a instrução propicia a participação imersiva dos estudantes em ambientes de realidade virtual. Essa imersão se dá por meio da facilitação do sentimento de presença e/ou agência.

Enquanto a presença tem a ver com o sentimento de estar presente, a agência está relacionada com o sentimento de controlar o ambiente de aprendizagem. Essas duas

possibilidades de interação em ambientes virtuais são mais ou menos influenciadas por fatores tecnológicos, tais como nível de imersão, controle e fidelidade representacional.

O modelo de Makransky e Peterson (2021) descreve como a presença e agência impactam seis fatores afetivos e cognitivos mobilizados por meio da aprendizagem imersiva: interesse situacional, motivação intrínseca, autoeficácia, *embodiment*, carga cognitiva e autorregulação. Dessa forma, o resultado da aprendizagem está associado às relações estabelecidas entre as variáveis tecnológicas e os construtos mentais destacados.

O interesse situacional se refere às reações emocionais ativadas por estímulos atencionais provenientes de um determinado contexto/situação. A novidade que uma ferramenta tecnológica proporciona geralmente atrai a atenção e pode instigar o estudante a querer saber mais sobre o material instrucional e/ou conteúdo (Hidi; Renninger, 2006). Makransky e Peterson (2021) argumentam que altos níveis de presença e agência trazem mais engajamento, uma vez que os estudantes ficam mais interessados em participar de uma tarefa mais interativa.

A motivação intrínseca é uma reação que move o estudante em direção à aprendizagem, pela satisfação proporcionada pela execução dessa atividade. Não há, nesse caso, um estímulo externo como a oferta de recompensa ou punição (Deci; Ryan, 2000). No contexto da motivação para aprender por meio de tecnologias digitais, os achados de David e Weinstein (2024) vão ao encontro do que Deci e Ryan (2000) apontaram como os construtos responsáveis pela modulação da motivação intrínseca: relacionamento, competência e autonomia. Makransky e Peterson (2021) pontuam que o ambiente de realidade virtual pode ser enriquecido com elementos motivacionais, desde que promovam a socialização com personagens, feedback em tempo real e oportunidades para tomada de decisão. Dessa forma, os recursos potencializadores do sentimento de presença e agência podem influenciar o estado de motivação do sujeito.

A autoeficácia é conceituada como as capacidades percebidas para aprender ou realizar ações em graus de desempenho que uma pessoa acredita ser capaz de alcançar (Schunk; DiBenedetto, 2016). Isso significa que, para aprender algo novo, o estudante precisa estar confiante de suas próprias habilidades para enfrentar os desafios e persistir, buscando alcançar os resultados esperados. Makransky e Peterson (2021) enfatizam que presença e agência desempenham um papel crucial na percepção dos estudantes quanto às tarefas a serem desenvolvidas em realidade virtual. A experiência no cenário virtual pode contar com graus significativos de autoeficácia, uma vez que o estudante pode se sentir mais capaz de realizar as tarefas em um ambiente “realístico”, possuindo, inclusive, o controle da situação. Para isso, os

recursos para promover o sentimento de presença e agência necessitam, mais uma vez, serem contemplados suficientemente.

Em contextos de realidade virtual imersiva, o conceito de "*embodiment*" se relaciona com a experiência de ter um corpo no ambiente virtual. Essa experiência é validada tanto pela percepção desse corpo virtual quanto pela habilidade de controlar suas ações (Makransky; Peterson, 2021). A sensação de estar presente no ambiente virtual (presença), somada à percepção das ações de um corpo virtual (agência) resulta em sentimento de "*embodiment*". Gall *et al.* (2021) apresentaram evidências experimentais que sustentam a hipótese de que a experiência de "ter um corpo dentro de um ambiente virtual" intensifica a resposta emocional diante de estímulos encontrados nesse meio.

Dada a importância do planejamento para se adequar às características do conteúdo a ser ensinado e ao material instrucional a ser apresentado, o CAMIL considera princípios da Teoria da Carga Cognitiva (Sweller, 2011). A referida teoria é fundamental para entender como as informações são processadas, mostrando as relações entre a capacidade de memória de trabalho e de consolidação das informações na memória de longo prazo. Isso quer dizer que as estratégias de ensino e aprendizagem podem ser pensadas levando em conta a regulação de recursos cognitivos com o objetivo de alcançar o melhor desempenho acadêmico possível. Com isso, a produção de ambiente virtual para a aprendizagem imersiva pode ser informada por essa teoria, visando minimizar a sobrecarga cognitiva e maximizar a compreensão de informações. Makransky e Peterson (2021) exemplificam que altos níveis de presença e agência podem aumentar a carga cognitiva extrínseca – relativa a como as informações são apresentadas ao aluno – e prejudicar o desempenho do estudante, causando desorientação.

Segundo Zimmerman (2002), a autorregulação da aprendizagem é um processo ativo e construtivo, em que os estudantes estabelecem metas para a sua aprendizagem e utilizam estratégias para monitorar e regular sua atenção, motivação e comportamento. Makransky e Peterson (2021) ressaltam que, no âmbito da realidade virtual, a autorregulação pode ser proporcionada por meio da interação com outros personagens e possibilidades de controle do cenário que levem à reflexão. O importante é desenhar a tarefa de modo a estimular processos metacognitivos e minimizar estímulos atencionais – causados por altos níveis de presença e/ou agência – distraidores.

O CAMIL (Makransky; Peterson, 2021) se apresenta, portanto, como uma oportunidade reflexiva para a elaboração, implementação e avaliação da aprendizagem em tarefas imersivas com realidade virtual. Dessa forma, as possibilidades de trabalho com a tecnologia de realidade

virtual, em decorrência das relações entre as variáveis tecnológicas e psicológicas por trás da aprendizagem imersiva, podem beneficiar a aprendizagem de geometria molecular. Além disso, dadas as características visuoespaciais das noções de geometria molecular e da experiência com realidade virtual, as habilidades espaciais requeridas para lidar com o conteúdo podem ser facilmente abordadas por meio desta tecnologia.

### **4.3.3 Metodologia**

#### **4.3.3.1 Desenho experimental**

Em uma perspectiva quase-experimental, o estudo envolveu a comparação de dois grupos de estudantes de nível superior (graduação), distintos pelos seus conhecimentos prévios em química. O grupo composto por estudantes das áreas de ciência, tecnologia e engenharia ( $n=20$ ) tinha mais conhecimentos em química geral, enquanto o grupo de estudantes do curso de psicologia ( $n=30$ ) apresentava menos conhecimentos prévios em química. A confirmação dos diferentes níveis de conhecimento prévio se deu a partir dos resultados do pré-teste sobre geometria molecular. Estudantes de qualquer ano da graduação foram incluídos.

A diferenciação entre os grupos foi reforçada pelos relatos dos estudantes das áreas de ciência, tecnologia e engenharia, que confirmaram ter estudado química básica anteriormente, em contraste com os estudantes de psicologia, que, em sua maioria, não recordavam o conteúdo de geometria molecular apesar de terem sido expostos a ele em aulas de química no passado.

A pesquisa foi realizada no laboratório de realidade estendida da Escola de Psicologia da Universidade de Surrey, Inglaterra, durante o segundo semestre de 2023. O processo de recrutamento dos participantes variou conforme o grupo: para o grupo com maior conhecimento prévio em química, utilizou-se a estratégia de panfletagem nas áreas de ciência, tecnologia e engenharia, enquanto o grupo com menos conhecimento prévio em química foi recrutado por meio do Sistema de Participação em Pesquisas em Psicologia da universidade. Em geral, participaram do estudo 16 estudantes do sexo masculino e 34 do sexo feminino. Os questionários de coleta dos dados foram desenvolvidos e administrados através da plataforma *Qualtrics*®. Cada participante assinou um termo de consentimento (Apêndice B) antes de participar das atividades da intervenção.

A intervenção foi organizada em sessões individuais e agendadas previamente, com cada sessão durando até 50 minutos. A sequência de atividades iniciou com um teste de rotação

mental, destinado à avaliação das habilidades espaciais dos participantes, seguido pelo pré-teste sobre geometria molecular (Apêndice I). Uma tabela periódica dos elementos (Apêndice J) foi disponibilizada durante os testes. Após esses testes iniciais, os estudantes foram submetidos à intervenção didática utilizando realidade virtual e projetada para durar 20 minutos. Concluindo a sessão, os participantes responderam a um questionário de satisfação e, por fim, ao pós-teste sobre geometria molecular.

Um aspecto central da aprendizagem com realidade virtual envolve habilidades visuoespaciais, motivo pelo qual o Teste de Visualização de Rotações de Purdue (*PVRT*) foi empregado como o primeiro instrumento de avaliação. O referido teste é reconhecido por medir um aspecto chave da habilidade espacial: a rotação mental de objetos (Guay, 1976). Ao longo das últimas quatro décadas, o *PVRT* tem sido amplamente utilizado em pesquisas educacionais, especialmente nas áreas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática, para determinar o papel das habilidades espaciais na aprendizagem de conceitos científicos (Uttal *et al.*, 2013).

Para adequação ao contexto do estudo, adaptou-se o *PVRT* revisado por Yoon (2011), limitando sua aplicação a um período de até 10 minutos. Desta maneira, foram selecionados somente os itens ímpares do teste, totalizando 15 itens que incluíam questões de níveis variados de dificuldade. A confiabilidade do teste foi confirmada por um alfa de *Cronbach* de 0,79, indicando sua adequação para as amostras avaliadas.

Para verificar o efeito de uma possível aprendizagem pela realização repetida do teste (Eisenkraemer; Jaeger; Stein, 2013), quatorze estudantes adicionais com diferentes níveis de conhecimento em química foram convidados a realizar o pré-teste e, após 10 minutos, a respondê-lo novamente. Ao fazer uma análise estatística, os resultados do teste *t* pareado não mostraram uma diferença estatisticamente significativa entre as médias do pré-teste e pós-teste ( $t(13) = 0,000$ ,  $p = 1,0$ ). A média do pré-teste foi de 3,42 ( $DP = 1,69$ ), enquanto a média do pós-teste foi de 3,42 ( $DP = 1,78$ ). Os resultados indicam que não há aprendizagem apenas pelo fato de fazer o teste sobre geometria molecular e refazê-lo em outro momento.

No final da intervenção, os participantes responderam a um questionário de satisfação (Alfa de *Cronbach* = 0,73), composto por 8 itens, para avaliar as tarefas realizadas durante a intervenção.

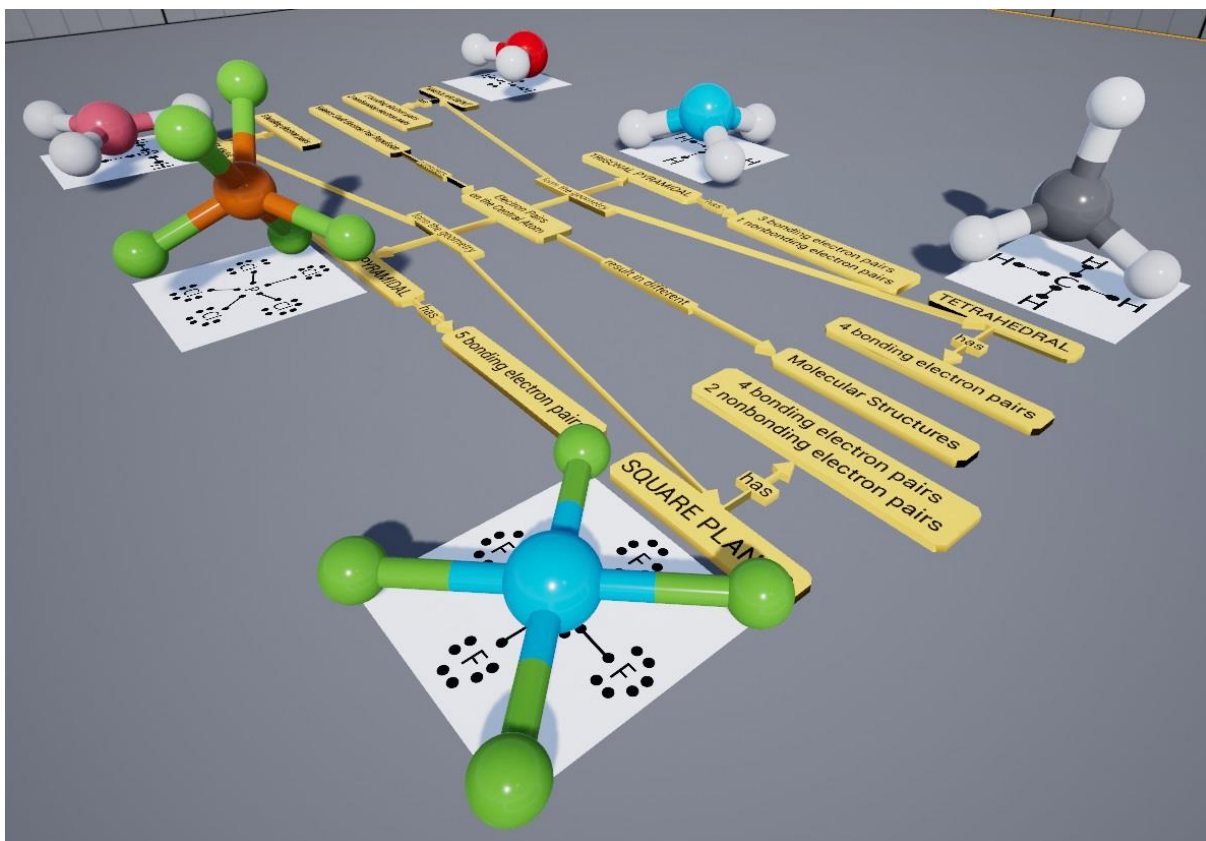
#### 4.3.3.2 Intervenção

A intervenção didática, conduzida diretamente pelo pesquisador que também é professor de química, foi cuidadosamente planejada em três etapas para abordar as noções básicas de geometria molecular. Na primeira etapa, o foco foi na interação com um mapa conceitual sobre geometria molecular. O referido mapa (Apêndice D) serviu como um guia para a organização do conhecimento relativo às características eletrônicas das diversas geometrias moleculares. Após a apresentação e leitura do mapa conceitual pelo pesquisador, os estudantes tiveram a oportunidade de esclarecer dúvidas, seguida pela solicitação de desenhar as estruturas de Lewis correspondentes nas lacunas previstas no mapa. Para facilitar a compreensão e servir como modelo, o pesquisador exemplificou o processo desenhando as moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{PCl}_5$ . Esta etapa foi concluída com uma revisão mediada pelo pesquisador, durante a qual os participantes puderam corrigir eventuais erros em seus desenhos, promovendo uma aprendizagem ativa e reflexiva.

A segunda etapa introduziu a tecnologia de realidade virtual, proporcionando aos participantes uma experiência imersiva com equipamentos de alta qualidade, incluindo óculos de realidade virtual (*Oculus Rift headset*®) vinculado a um computador (*Multiple Alienware Aurora*®) e sensores de captação de movimento, além de controladores para simular as mãos. O aplicativo de realidade virtual foi desenvolvido gratuitamente por meio do software *Unreal Engine*®.

Através desta experiência, os estudantes "caminharam" sobre o mapa conceitual, com a tarefa de alocar moléculas, inicialmente dispersas no cenário virtual, nas respectivas lacunas do mapa (Figura 26). Nessa tarefa, solicitou-se aos estudantes que alocassem as moléculas acima das respectivas representações bidimensionais e justificassem suas escolhas.

Figura 26 – Cenário de realidade virtual construído para estudar geometria molecular



Fonte: Os autores.

Na etapa final da intervenção, os participantes foram desafiados a aplicar seus conhecimentos de forma prática, por meio da construção de modelos moleculares físicos. Utilizando bolas de isopor e varetas, os estudantes criaram representações físicas das moléculas  $\text{SF}_2$  e  $\text{PCl}_3$ . Essa atividade manual complementou as etapas anteriores, permitindo a visualização e manipulação direta das estruturas moleculares. Após a tarefa, o pesquisador ofereceu um feedback construtivo e orientou os participantes na correção de eventuais erros.

Portanto, por meio desta intervenção tríplice, que combinou a exploração de conceitos teóricos com a aplicação prática e a experiência imersiva, buscou-se promover uma compreensão integrada da geometria molecular.

### 4.3.4 Resultados e discussão

#### 4.3.4.1 Relação entre teste de rotação mental e conhecimentos prévios (pré-teste)

Realizou-se uma análise estatística para compreender a relação entre a habilidade espacial (rotação mental) de todos os participantes e seus conhecimentos prévios em geometria molecular. Com um coeficiente de correlação de *Spearman* de 0,257 e um valor  $p = 0,071$ , verificou-se que não há uma correlação significativa entre o desempenho no teste de rotação mental e o nível de conhecimento prévio dos participantes em geometria molecular.

Além disso, empregou-se o teste *U* de Mann-Whitney para avaliar diferenças na habilidade de rotação mental dos grupos com alto e baixo conhecimento prévio. Os resultados indicaram um valor *U* de 255,5 com um valor  $p = 0,376$ . Essa análise não revelou diferenças estatisticamente significativas entre o grupo com alto conhecimento prévio em química geral ( $n=20$ ;  $M=8,1$ ;  $DP=3,6$ ) e o grupo com baixo conhecimento prévio ( $n=30$ ;  $M=7,3$ ;  $DP=3,5$ ) quanto ao desempenho no teste de rotação mental. Ou seja, independentemente do nível de conhecimento prévio em química, os participantes dos dois grupos demonstraram habilidades de rotação mental comparáveis.

Portanto, os dados mostram que a habilidade de rotação mental, por si só, pode não ser um fator determinante para o conhecimento prévio de geometria molecular. O interessante é que, embora a habilidade de rotação mental seja importante para o sucesso acadêmico em ciências (Sorby, 2009), a geometria molecular pode ser aprendida, independentemente do nível dessa habilidade. Harle e Towns (2011), por exemplo, recomendam que estratégias analíticas para a resolução de tarefas químicas sejam ensinadas, a fim de minimizar a dependência por habilidades de rotação mental.

No estudo de Keller, Rumann e Habig (2021), os autores apontam que, tradicionalmente, considera-se que habilidades espaciais, como a rotação mental, são essenciais para entender a química. No entanto, eles sugerem que o uso de ferramentas tecnológicas como a realidade aumentada pode diminuir a necessidade dessas habilidades para se alcançar sucesso no aprendizado. O artigo explora como a realidade aumentada pode facilitar o aprendizado ao oferecer diferentes tipos de representações visuais, evitando assim a sobrecarga cognitiva que frequentemente acompanha os métodos de ensino mais convencionais, que dependem intensamente de habilidades espaciais.

#### 4.3.4.2 Antes e após a intervenção

Analisando-se os resultados obtidos antes e após a intervenção, observou-se uma distinção clara entre os grupos com diferentes níveis de conhecimento prévio em geometria

molecular. A utilização do teste  $U$  de Mann-Whitney (Tabela 5) permitiu identificar uma diferença estatisticamente significativa nos resultados do pré-teste entre o grupo com alto conhecimento prévio ( $n=20$ ) e o grupo com baixo conhecimento prévio ( $n=30$ ), com um valor  $U$  de 141 e  $p = 0,001$ . Esse resultado era esperado e pode ser atribuído às diferenças no interesse e na base de conhecimento dos participantes, que são oriundos de áreas do conhecimento distintas. Esse achado indica que a motivação intrínseca (Deci; Ryan, 2000), associada ao interesse pela disciplina pode influenciar o desempenho dos estudantes em testes de conhecimento específico, como os de geometria molecular.

Tabela 5 –  $U$  de Mann-Whitney para o pré-teste e pós-teste sobre geometria molecular

	Média (Desvio Padrão)		p-valor	Tamanho do efeito, $g$ de Hedges
	Alto conhecimento prévio ( $n=20$ )	Baixo conhecimento prévio ( $n=30$ )		
Pré-teste	4,05 (2,91)	1,60 (1,22)	0,001	1,18
Pós-teste	6,55 (2,74)	5,93 (1,98)	0,178	0,24

Um  $g$  de Hedges menor que 0,3 indica um efeito pequeno, entre 0,3 e 0,5 um efeito médio, e acima de 0,5 um efeito grande.

Fonte: Os autores.

Por outro lado, interessante, o teste  $U$  de Mann-Whitney aplicado para avaliar os resultados do pós-teste sobre geometria molecular não demonstrou uma diferença estatisticamente significativa entre os dois grupos, apresentando um valor  $U$  de 233 e  $p = 0,178$ . Este resultado indica que a intervenção didática teve um "efeito nivelador", contribuindo para que ambos os grupos avançassem em seu aprendizado de geometria molecular de forma mais homogênea. Isso sugere que a intervenção foi capaz de proporcionar aos participantes, independentemente de seu conhecimento prévio, uma oportunidade equitativa de compreender e assimilar os conceitos fundamentais da geometria molecular.

Além disso, ao analisar especificamente o ganho de aprendizagem promovido pela intervenção (considerando a diferença entre os resultados do pós-teste e do pré-teste), constatou-se uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos, com um valor  $U$  de 166,5 e  $p = 0,008$  no teste  $U$  de Mann-Whitney. O grupo com baixo conhecimento prévio demonstrou ser o mais beneficiado pela intervenção, alcançando o maior ganho de aprendizagem. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de a intervenção ter sido direcionada às noções básicas de aprendizagem em geometria molecular, fazendo com que os participantes com menor base de conhecimento prévio tivessem uma maior margem para avanço em seu

aprendizado, em comparação com aqueles que já possuíam uma compreensão inicial mais sólida.

A eficácia da intervenção se deve ao planejamento das tarefas com base em evidências científicas orientadas por diferentes lentes teóricas. Inspirou-se, por exemplo, no efeito do exemplo trabalhado (Sweller; Van Merriënboer; Paas, 1998) para a condução da tarefa de desenho da estrutura de Lewis nas lacunas do mapa conceitual. Apresentou-se duas respostas completas, antes de os participantes realizarem as tarefas semelhantes por conta própria. Esta abordagem buscou ajudar os estudantes a entenderem o processo para resolver o problema, possivelmente reduzindo a carga cognitiva e facilitando o aprendizado autônomo subsequente.

Além disso, o mapa conceitual foi utilizado como organizador gráfico do conhecimento (Novak, 2010) para declarar as principais relações conceituais em torno da noção de geometria molecular. Uma estratégia generativa de aprendizagem (Fiorella; Mayer, 2016) foi empregada quando foi solicitado que os estudantes lessem o mapa conceitual em voz alta. A ideia foi facilitar o processo de seleção, organização e integração das informações a partir de uma leitura monitorada pelo pesquisador.

A segunda tarefa da intervenção contou com a experiência imersiva com realidade virtual e foi fundamentada segundo os princípios de aprendizagem apresentados por Makransky e Peterson (2021), em seu Modelo Cognitivo-Afetivo de Aprendizagem Imersiva. Os fatores tecnológicos (imersão, controle, fidelidade representacional) empregados e fatores psicológicos considerados (interesse, motivação, autoeficácia, *embodiment*, carga cognitiva, autorregulação) foram gerenciados para oferecer uma experiência gratificante e com a menor carga cognitiva extrínseca possível.

Para promover o sentimento de presença e agência (Makransky; Peterson, 2021), produziu-se um cenário de realidade virtual com característica imersiva, onde é possível se locomover e interagir com os objetos virtuais. O fator de controle foi satisfeito ao permitir que o sujeito pegasse as moléculas do cenário, podendo analisá-las e colocá-las nos lugares corretos. Para atender ao critério da fidelidade representacional, o cenário foi produzido em um ambiente “realístico”, com o mapa conceitual disposto no chão como uma espécie de tapete, por onde o participante podia caminhar. Além disso, utilizou-se representações moleculares de bolas e varetas para facilitar a visualização de aspectos conformacionais.

Quanto aos fatores psicológicos, o interesse e motivação foram estimulados a partir da novidade que a tecnologia proporcionou e possibilidade de interação com o pesquisador durante a tarefa. Os elementos digitais disponíveis no cenário virtual proporcionaram o sentimento de

autoeficácia, ao permitir que o participante pudesse se sentir capaz de ter controle da tarefa, contando com o apoio de conceitos e diferentes representações visuais à sua disposição. Para propiciar uma experiência ainda mais imersiva, o participante teve “mãos virtuais” que acompanharam seus movimentos, gerando uma sensação positiva de estar presente no ambiente (*embodiment*). Os elementos digitais empregados na tarefa imersiva auxiliaram a maioria dos estudantes a cumprir os objetivos de visualização visados pelo ensino. Para reduzir a carga cognitiva extrínseca, relativa aos estímulos utilizados, optou-se por um cenário limpo e neutro, contando apenas com os objetos virtuais e ações necessárias para evitar sobrecarga cognitiva.

Na primeira versão do aplicativo, por exemplo, o mapa conceitual foi posicionado em cima de uma mesa, localizada no centro do ambiente, e os participantes deveriam caminhar ao redor da mesa para inserir as moléculas 3D – que estavam em outra mesa ao lado – sobre as moléculas 2D do mapa conceitual. No teste de viabilidade, em decorrência da limitação do sensor de presença e do espaço físico, percebeu-se que o participante tinha que utilizar o recurso de teletransporte constantemente e acabava desorientado por não estar familiarizado com o comando. Para resolver este problema, abdicou-se da fidelidade representacional que a mesa proporcionava, alocando o mapa conceitual no chão para restringir a ação do participante a segurar e soltar a molécula, permitindo que caminhasse sobre o mapa. Essa estratégia reduziu a carga extrínseca que poderia desviar a alocação de recursos cognitivos para informações relevantes.

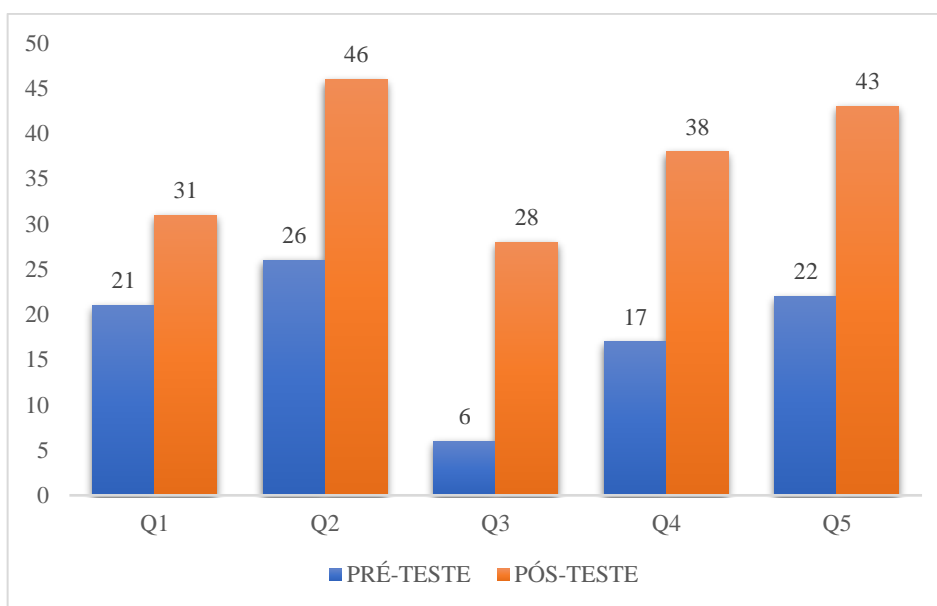
A autorregulação da aprendizagem foi estimulada por meio da orientação para que os estudantes respondessem em voz alta o motivo da troca de lugar das moléculas. Com isso, durante todo o processo de ambientação e ação, o estudante era estimulado a encontrar estratégias para resolver as tarefas. Portanto, consciente da meta a ser alcançada, o estudante podia regular sua atenção, motivação e comportamento.

De modo geral, os recursos utilizados na intervenção foram organizados em compatibilidade com um design instrucional orientado pela noção de aprendizagem multimídia trazida por Mayer (2008). No estudo sobre ciência da aprendizagem, o autor destaca três componentes cruciais: primeiramente, os canais duplos, que se referem à capacidade humana de processar informações visuais e verbais por meio de canais distintos; em segundo lugar, a capacidade limitada, que sugere que cada um desses canais só consegue lidar com uma quantidade restrita de informações por vez; e, finalmente, o processamento ativo, que é crucial para uma aprendizagem profunda e envolve o engajamento cognitivo do estudante em atividades como selecionar, organizar e integrar o conteúdo aprendido.

#### 4.3.4.3 Análise das questões do pré-teste e pós-teste

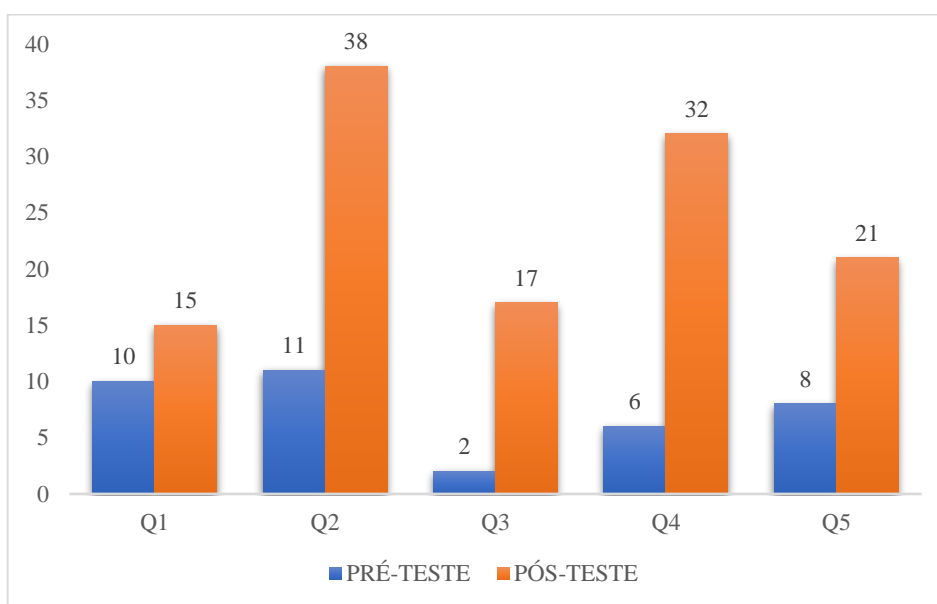
Na análise das questões do pré-teste e pós-teste, procurou-se avaliar o impacto direto da intervenção na aprendizagem dos participantes em conceitos básicos de geometria molecular. Os dados foram analisados identificando-se os acertos e erros nas questões de múltipla escolha e abertas, representadas nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 27 – Frequência de acertos em cada questão de múltipla escolha do pré-teste e pós-teste



Fonte: Os autores.

Figura 28 – Frequência de acertos em cada questão aberta (justificativa) do pré-teste e pós-teste



Fonte: Os autores.

A intervenção mostrou-se menos eficaz para aprimorar o desempenho na questão 1, o que se deve, possivelmente, à falta de apresentação de modelos moleculares complexos durante a intervenção, como a conformação zig-zag dos carbonos. A estratégia adotada esperava que os estudantes inferissem essas informações complexas a partir das atividades de visualização em realidade virtual e montagem de moléculas. Embora eficaz para alguns, essa abordagem ressaltou a necessidade de uma explanação mais direta sobre a configuração espacial de moléculas complexas. Notavelmente, algumas justificativas pós-intervenção evidenciaram compreensão sobre a configuração espacial angular em torno do oxigênio, sugerindo um aprendizado específico facilitado pela intervenção. Essas evidências ressaltam a importância da instrução explícita, em oposição à instrução implícita, para a aquisição de conhecimentos científicos (Khishfe; Abd-El-Khalick, 2002), uma vez que informações triviais ao professor podem não ser facilmente detectadas pelos estudantes.

Quanto à questão 2, as diversas estratégias utilizadas na intervenção se mostraram benéficas, principalmente para estudantes com baixo conhecimento prévio, permitindo-lhes compreender a importância dos pares de elétrons ligantes e não ligantes. Esse avanço sugere que o trabalho com o mapa conceitual permitiu aos estudantes alcançarem um entendimento satisfatório, mesmo sem uma explicação explícita sobre o significado das projeções das ligações químicas.

Para responder corretamente à terceira pergunta, era essencial que os alunos compreendessem a distinção entre a geometria ou orientação eletrônica e a geometria molecular específica da água. O material apresentado durante a exploração do mapa conceitual elucidou que a geometria eletrônica é distinta da geometria molecular. Foi esclarecido que tanto os pares de elétrons ligantes quanto os não ligantes possuem uma orientação espacial específica, resultando na chamada “geometria eletrônica”. Em relação ao pré-teste, observou-se uma melhora no desempenho dos estudantes nesta questão específica, embora a compreensão não tenha sido alcançada pela maioria. A forma passiva como os estudantes foram expostos a essa informação pode ter limitado a compreensão mais abrangente. A instrução fornecida pelo pesquisador, por exemplo, foi breve e não foi reforçada durante as atividades subsequentes. Ademais, a discrepância entre o percentual de acertos na questão de múltipla escolha (56%) e o baixo índice de acerto na questão dissertativa (34%) sugere que, embora os estudantes pudessem reconhecer que a geometria molecular da água é angular e distinta da geometria eletrônica — o que os levou a selecionar a alternativa c —, alguns não justificaram suficientemente essa diferença em termos da repulsão entre os pares eletrônicos.

Os resultados para a questão 4 mostram que a maioria dos estudantes compreendeu as noções discutidas em cada etapa da intervenção. A compreensão das geometrias das moléculas  $\text{BH}_3$  e  $\text{NH}_3$ , exploradas tanto no mapa conceitual quanto na realidade virtual, foi corroborada por justificativas que enfatizaram a repulsão eletrônica. Contudo, algumas respostas corretas revelaram uma tendência dos estudantes em adotar estratégias analíticas, como a quantificação de pares de elétrons, sem uma compreensão profunda sobre a repulsão eletrônica, o que acende um alerta sobre a necessidade de uma abordagem pedagógica que reforce a compreensão conceitual além da estratégia analítica (Kiernan; Manches; Seery, 2021).

Interessantemente, na questão 5, uma grande maioria (86%) acertou a alternativa de múltipla escolha, enquanto menos da metade (42%) justificou corretamente suas escolhas. Este padrão sugere que, especialmente entre os participantes com baixo conhecimento prévio, uma estratégia equivocada, mas eficaz, foi adotada para resolver a questão. A representação molecular enunciada na questão tem um átomo “A” ligado a dois átomos “X”. Das alternativas, a fórmula molecular  $\text{SH}_2$  é a que mais se aproxima. Na visão de alguns estudantes que não souberam justificar, o Be do  $\text{BeH}_2$ , por exemplo, não é compatível com o “A” da representação. Tal fenômeno destaca a complexidade de ensinar conceitos científicos e a necessidade de estratégias didáticas que previnam mal-entendidos e facilitem a aplicação correta de conhecimentos recém-adquiridos em contextos diversos.

O teste incluiu questões que lidam com todas as habilidades espaciais, conforme descritas por Carlisle, Tyson e Nieswandt (2015). Por exemplo, a questão 3 do pré-teste pode ser abordada aplicando o conceito de simetria para entender a orientação eletrônica tetraédrica da molécula de água, apesar de sua geometria molecular ser angular devido à disposição assimétrica dos pares de elétrons não ligantes. A habilidade de visualização, por sua vez, é fundamental para que os estudantes estabeleçam relações espaciais entre átomos dentro de uma molécula, competência requisitada em todas as questões do pré-teste.

Quanto à habilidade de representação, os estudantes que não estão familiarizados com fórmulas moleculares, especialmente nas questões 3 e 4 do pré-teste, dependem das representações das estruturas de Lewis para resolver as questões. Em termos de habilidade de translação, o pré-teste incorporou diferentes representações para permitir que os estudantes extraíssem informações complementares.

#### 4.3.4.4 Estratégias empregadas pelos participantes durante a tarefa imersiva com realidade virtual

Identificou-se duas estratégias adotadas pelos participantes para alocar as moléculas nas colunas corretas do mapa conceitual. A primeira estratégia, empregada pela maioria dos estudantes que conseguiram posicionar corretamente as moléculas nas seis colunas do mapa conceitual ( $n=28$ ), consistiu na tentativa inicial de associar a representação bidimensional fornecida pelo mapa conceitual com as representações tridimensionais visualizadas na realidade virtual. Essa abordagem incluiu a contagem em voz alta dos átomos ligados ao átomo central, acompanhada por gestos manuais.

No entanto, essa técnica mostrou-se ineficaz para diferenciar moléculas com o mesmo número de átomos ligados ao átomo central. Diante dessa dificuldade, os estudantes passaram a adotar uma estratégia alternativa, iniciando a leitura do mapa conceitual por sua extremidade, o que facilitou a associação das legendas das geometrias com as respectivas moléculas, especialmente no caso das geometrias trigonal planar e quadrática planar, consideradas mais intuitivas pelos participantes. Em resposta ao questionamento do pesquisador sobre a estratégia utilizada, os estudantes explicaram seu raciocínio em termos de repulsão eletrônica, sempre fazendo a leitura das quantidades de elétrons ligantes e não ligantes das moléculas.

A segunda estratégia foi observada por 18 estudantes que confundiram a localização de duas moléculas específicas, trocando as posições do  $\text{CH}_4$  e do  $\text{XeF}_4$ . Esta abordagem inicial baseou-se exclusivamente na contagem dos átomos ligados ao átomo central, sem uma leitura adequada do mapa conceitual, e resultou na aplicação de uma técnica equivocada para diferenciar moléculas como  $\text{NH}_3$  de  $\text{BH}_3$  e  $\text{CH}_4$  de  $\text{XeF}_4$ . Os participantes assumiram incorretamente que a presença de pares de elétrons não ligantes em um átomo central indicaria uma estrutura não plana, levando à troca entre o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{XeF}_4$ . A identificação desse equívoco ressalta a importância de os professores estarem atentos a estratégias intuitivas adotadas pelos estudantes, pois, embora pareçam lógicas, podem ser baseadas em entendimentos incorretos (Silva; Correia, 2023a).

Adicionalmente, quatro estudantes encontraram dificuldades durante a atividade de realidade virtual, a ponto de relatarem desconforto e desorientação no cenário virtual. Diante dessa situação, a atividade foi interrompida e o pesquisador recorreu ao uso de modelos moleculares 3D em computador para explicar as moléculas correspondentes a cada representação 2D do mapa conceitual. Esse caso destaca a necessidade de considerar a

familiaridade e o conforto dos estudantes com tecnologias de realidade virtual, reconhecendo que a desorientação provocada pela sobrecarga cognitiva em ambientes virtuais pode impactar negativamente a experiência de aprendizagem (Zhang; Liu, 2023).

#### 4.3.4.5 Tarefa de montagem de moléculas

Na tarefa de montagem de moléculas, os participantes foram solicitados a aplicar os conceitos de geometria molecular por meio da representação de estruturas de Lewis e construção de modelos físicos. Dos 50 participantes, 30 conseguiram montar ambas as moléculas corretamente, demonstrando uma compreensão adequada da estrutura molecular e aplicação deste conhecimento na criação de modelos físicos. Dessa forma, os resultados mostram que a intervenção foi eficaz em propiciar a aprendizagem de conceitos de geometria molecular.

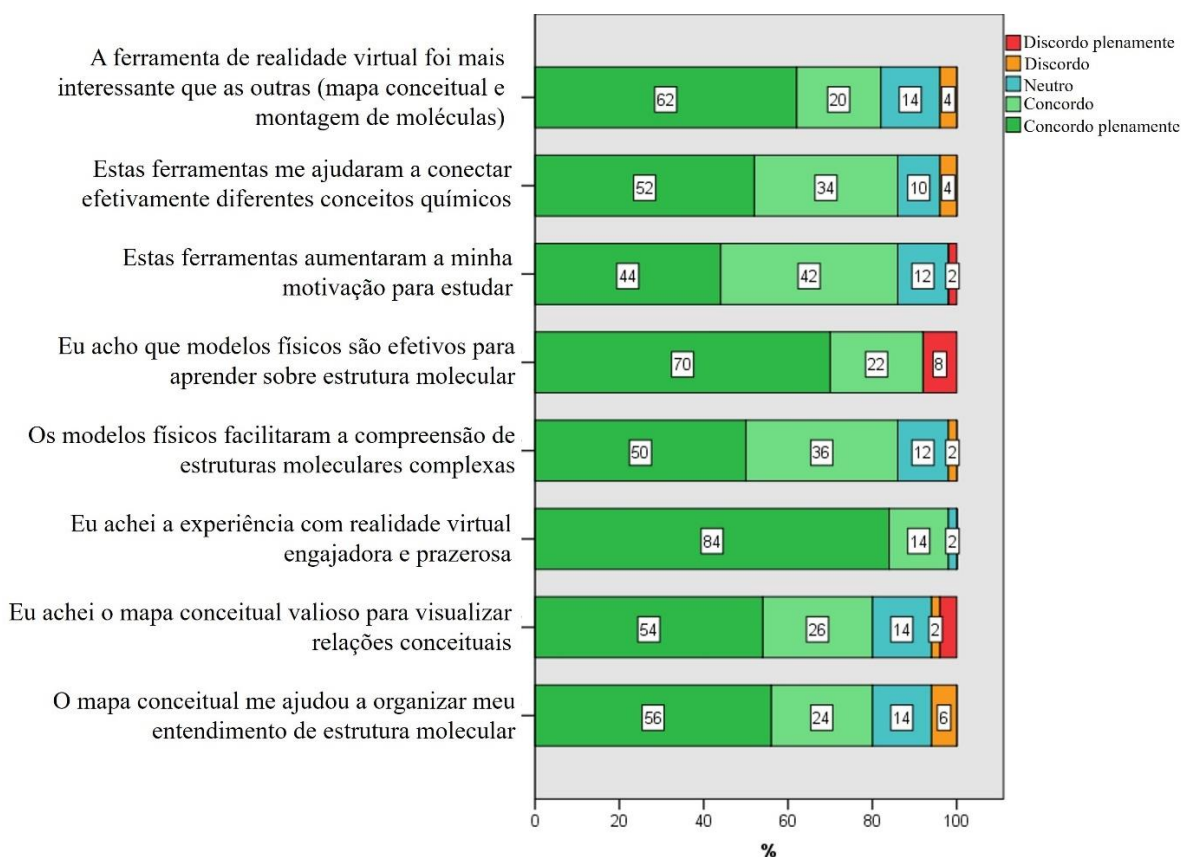
Entretanto, 12 participantes montaram apenas uma das moléculas de forma correta, e 8 não conseguiram montar nenhuma das moléculas corretamente. Ou seja, apesar de uma parte dos estudantes ter assimilado os conceitos teóricos, houve dificuldades na aplicação desses conhecimentos de forma prática.

Um achado interessante foi que 45 estudantes conseguiram desenhar as representações de Lewis corretamente para ambas as moléculas. Isso destaca uma desconexão importante entre a compreensão teórica dos conceitos e a habilidade de aplicá-los na montagem de modelos físicos. Dessa forma, a falha em aplicar a noção de repulsão eletrônica na montagem das moléculas físicas, apesar de compreender e desenhar corretamente as estruturas de Lewis, ressalta uma lacuna importante entre o conhecimento teórico e a habilidade prática.

#### 4.3.4.6 Questionário de satisfação

O questionário de satisfação aplicado após a intervenção didática revelou uma aceitação positiva das ferramentas utilizadas: mapa conceitual, realidade virtual e montagem de moléculas físicas. Os resultados (Figura 29) mostram que os estudantes reconheceram a utilidade de cada uma dessas ferramentas para o aprendizado de geometria molecular.

Figura 29 – Resultado da avaliação do questionário de satisfação acerca da intervenção didática



Fonte: Os autores.

A experiência com o mapa conceitual para organizar o conhecimento foi avaliada positivamente, permitindo enxergar relações conceituais importantes para a compreensão das noções de geometria molecular. Inicialmente, o comando “leia o mapa conceitual” não teve o efeito esperado, pois alguns estudantes ficaram desorientados durante a leitura. Dessa forma, a maioria dos estudantes não conhecia esse tipo de representação gráfica e precisou de orientações para fazer a leitura do mapa conceitual.

Embora o conjunto de tarefas da intervenção tenha sido o motivo do desempenho dos estudantes, a experiência com a realidade virtual se destacou e foi majoritariamente avaliada como envolvente e prazerosa. Com efeito, o potencial imersivo e engajador das tecnologias de realidade virtual na educação desperta o interesse dos estudantes e pode melhorar sua aprendizagem (Nisa *et al.*, 2021).

A montagem de moléculas físicas também foi bem recebida e se apresentou como primordial para colocar em prática a habilidade de translação e visualização (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015). Do ponto de vista translacional, os desenhos das estruturas de Lewis ganharam uma versão tridimensional, representando características complementares de uma

mesma molécula. Por fim, a coerência da representação dependeu da capacidade de os estudantes visualizarem as moléculas em 3D e estabelecerem relações espaciais entre os átomos.

#### **4.3.5 Considerações finais**

A intervenção didática implementada no presente estudo teve um papel importante na aprendizagem de noções básicas de geometria molecular. O uso da tecnologia de realidade virtual, por exemplo, foi um ponto forte na compreensão visuoespacial dos estudantes. Os resultados mostram que a imersão a partir da tecnologia chamou a atenção dos estudantes e facilitou a visualização de modelos moleculares tridimensionais.

O achado principal consistiu em verificar que a intervenção teve um efeito nivelador, aumentando o desempenho de estudantes com baixo e alto conhecimento prévio em química. Isso tem implicações em sala de aula porque há uma preocupação constante em elaborar materiais didáticos que atendam às necessidades de aprendizagem de um público diverso. Dessa forma, assume-se que o método instrucional é tão importante quanto o recurso tecnológico em si.

Vale salientar que o êxito da intervenção didática não deve ser atribuído exclusivamente à experiência com realidade virtual, mas ao conjunto das tarefas realizadas. Por exemplo, a leitura do mapa conceitual e o desenho das estruturas de Lewis nas lacunas, além da visualização de moléculas com realidade virtual e a montagem de modelos moleculares físicos contribuíram de forma integrada para uma aprendizagem satisfatória.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a realização de investigações adicionais para comparar grupos de estudantes com baixa e alta habilidade espacial em intervenções com realidade virtual. Como não houve diferença significativa entre os grupos analisados em termos de habilidade espacial, não foi possível analisar a relação dessa variável com o desempenho em geometria molecular. É importante investigar se, no contexto de aprendizagem imersiva, a habilidade espacial prediz o sucesso na intervenção didática. Também é pertinente analisar se a realidade virtual contribui mais para estudantes com baixa habilidade espacial, já que a carga cognitiva relativa ao entendimento das representações moleculares pode ser reduzida por meio da tecnologia.

Para concluir, não se pode desconsiderar os fatores emocionais envolvidos na aprendizagem com realidade virtual. A referida tecnologia não serve para todos. Cabe

investigar, por exemplo, se a condução de um treinamento para adaptação à tecnologia melhora a experiência de aprendizagem imersiva, reduzindo, portanto, a carga cognitiva extrínseca.

## 5 CONCLUSÃO DA TESE

A tese foi estruturada a partir da implementação de um método próprio de investigação. Levou-se em consideração que a elaboração de uma “estratégia pedagógica” - produto visado pelo ensino – requisita a conexão de dispositivos teóricos e práticos para alcançar os objetivos propostos.

O planejamento das estratégias pedagógicas empregadas contou com a interconexão de três componentes: características do saber, ferramentas pedagógicas e base teórica. No âmbito das "características do saber", a pesquisa revelou a necessidade de se conhecer os erros conceituais, as especificidades espaciais e a relação estrutura-propriedade associadas ao estudo da geometria molecular.

As "ferramentas pedagógicas", por sua vez, referem-se aos recursos empregados para atender às necessidades de aprendizagem identificadas. Na tese, a utilização de mapas conceituais, tecnologias de realidade aumentada e virtual, bem como modelos moleculares físicos demonstrou atender aos objetivos de aprendizagem.

A "base teórica" engloba a fundamentação que orienta o planejamento das estratégias pedagógicas. As teorias sobre o ensino de química, materiais instrucionais e de aprendizagem, por exemplo, serviram como bases para o desenvolvimento de métodos de ensino atraentes e eficazes. Com efeito, as múltiplas abordagens teóricas se complementam e contribuem para a compreensão do processo de aprendizagem. Por exemplo, os níveis do conhecimento químico (Johnstone; 1993) e níveis de concretude (Justi; Gilbert; Ferreira, 2009) dão suporte ao trabalho com múltiplas representações, visando o desenvolvimento de competências representacionais (Martina, 2017) e habilidades espaciais (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015). Do ponto de vista instrucional, os princípios que norteiam a aprendizagem por meio de mapas conceituais (Silva; Fonseca; Correia, 2020) e tecnologias digitais (Makransky; Peterson, 2021) orientam a produção de materiais pedagógicos compatíveis com as demandas do ensino de química.

Essa relação triádica estruturou a investigação e a prática educacional, atuando como uma metodologia. Assim, propõe-se uma abordagem metodológica para a investigação e ensino de conceitos de química, revelando-se a importância de uma prática integrada que combina conhecimento do saber a ser ensinado, ferramentas pedagógicas e fundamentação teórica pertinente.

Enquanto conclusões integradas da tese, os resultados dos estudos I, II e III se conectam para superar os desafios de aprendizagem. As implicações desta pesquisa apontam para a

importância de um ensino de química que integre ferramentas pedagógicas variadas, incluindo tecnologias digitais, em vez de depender exclusivamente de métodos tradicionais. Os erros conceituais identificados no estudo I devem ser vistos como oportunidades de reflexão para a elaboração de estratégias pedagógicas mais eficientes. Com efeito, ao identificar equívocos comuns – como a dificuldade em compreender a tridimensionalidade das moléculas – torna-se possível criar práticas direcionadas que utilizam tecnologias digitais para corrigir e esclarecer tais mal-entendidos.

O estudo II revelou que a tecnologia de realidade aumentada é um recurso potencialmente significativo para auxiliar os estudantes a desenvolverem uma boa percepção espacial das moléculas. No entanto, constatou-se que essa percepção aprimorada nem sempre se traduz em um entendimento suficiente da geometria molecular, sendo necessário buscar estratégias que agreguem essas ferramentas em um contexto de ensino mais amplo, incluindo discussões e práticas acerca da relação estrutura-propriedade.

O estudo III mostrou que uma abordagem pedagógica bem estruturada facilita a aprendizagem de estudantes com baixo e alto conhecimento prévio. Verificou-se que o método é tão importante quanto o recurso tecnológico. Assim, em contextos de sala de aula com disparidade de conhecimento prévio, é possível planejar uma intervenção didática com o apoio de tecnologia de realidade virtual para atender a diferentes públicos. Para isso, a pesquisa demonstrou que é essencial considerar fatores tecnológicos e psicológicos durante a elaboração do material instrucional.

Com isso, os resultados dos estudos I, II e III orientam a produção de técnicas e métodos que devem ser considerados durante a elaboração, implementação e avaliação de estratégias pedagógicas. Juntos, esses estudos respondem à pergunta central da tese, confirmando que os recursos visuoespaciais, quando integrados em uma estratégia de ensino bem estruturada, têm impactos positivos na aprendizagem de geometria molecular.

Conforme exposto, a pesquisa contribuiu significativamente para o ensino de geometria molecular, enfatizando a importância da utilização de tecnologias digitais para superar dificuldades associadas à visualização de estruturas tridimensionais. Porém, ao longo do processo investigativo, identificou-se limitações importantes que podem orientar estudos futuros.

Uma das limitações observadas durante a primeira intervenção – estudos I e II – foi a ausência de mediação do pesquisador para corrigir os erros conceituais identificados. Por exemplo, o formato do pós-teste, distinto do pré-teste, dificultou a análise do impacto da

intervenção didática do estudo II na superação das dificuldades de visualização apontadas no teste diagnóstico do estudo I. Além disso, os resultados do estudo III revelaram que o trabalho com moléculas simples não foi suficiente para a compreensão do arranjo espacial de moléculas mais complexas. Dessa forma, faz-se necessário desenvolver estratégias pedagógicas que integrem o desenvolvimento de habilidades de visualização e translação de múltiplas representações em tarefas especificamente planejadas para este propósito.

Outra limitação tem a ver com a necessidade de aprofundar a compreensão sobre como a estrutura molecular e as propriedades das substâncias são compreendidas e aplicadas por estudantes após o aprendizado. A investigação complementar do estudo II indica que, embora os estudantes revisem os conteúdos em seus aspectos conceituais e espaciais, nem sempre estão cientes da importância e aplicação desses conhecimentos em contextos reais.

A curta duração da intervenção didática no estudo III provoca questionamentos sobre a durabilidade do ganho de aprendizagem observado. É possível que o ganho de aprendizagem, especialmente no grupo com baixo conhecimento prévio, possa ser atribuído a uma aprendizagem superficial, em vez de uma compreensão adequada dos conceitos.

Dessa forma, as limitações da pesquisa emergiram de um processo de investigação múltipla, abrangendo diferentes cenários e variáveis. Os resultados de cada investigação exploratória (revisão sistemática da literatura, entrevista docente, aprendizagem com mapa conceitual) e aplicada (erros conceituais, aprendizagem como realidade aumentada, aprendizagem com realidade virtual) destacaram nuances da aprendizagem de geometria molecular com consequências práticas no contexto de sala de aula. Porém, há ainda fenômenos de aprendizagem a ser investigados em relação a cada pesquisa conduzida.

Em suma, a pesquisa avançou as discussões em educação química a partir de diferentes perspectivas. A identificação de erros conceituais revelou oportunidades de reflexão acerca da prática docente, possibilitando a antecipação de equívocos em sala de aula. As práticas de ensino com tecnologias emergentes (realidade aumentada, realidade virtual) reforçaram a importância dessas ferramentas no ensino contemporâneo e revelaram caminhos alternativos aos métodos tradicionais.

Para concluir, o desenvolvimento de uma metodologia de pesquisa e prática integrada ofereceu um modelo que pode ser adaptado para o ensino de outros tópicos, a partir de uma abordagem triádica que interliga conhecimento específico do saber (características do saber), ferramentas pedagógicas e uma base teórica robusta.

## REFERÊNCIAS

ABDINEJAD, M. *et al.* Student Perceptions using augmented reality and 3D visualization technologies in chemistry education. **J Sci Educ Technol**, v. 30, p. 87–96, 2021. DOI: 10.1007/s10956-020-09880-2.

ABUALIA, M. *et al.* Connecting protein structure to intermolecular interactions: a computer modeling laboratory. **J. Chem. Educ.**, v. 93, p. 1353–1363, 2016. DOI: 10.1021/acs.jchemed.5b00910.

ACUNA, S. R.; AYMES, G. L.; LOPEZ MEDRANO, C. S. Fostering Multimedia Learning with Collaborative Concept Mapping: The Effect of Cognitive Aid on Performance and on collaboration. **International Journal of Higher Education**, v. 3, n. 2, p. 141-152, 2014.

ADÚRIZ-BRAVO, A. Consideraciones acerca del estatuto epistemológico de la didáctica específica de las ciencias naturales. **Revista del Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Educación**, v. 9, n. 17, p. 49-52, 2000. Disponível em: [https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/69576/1/La\\_didactica\\_de\\_las\\_ciencias\\_como\\_discip.pdf](https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/69576/1/La_didactica_de_las_ciencias_como_discip.pdf). Acesso em: 06 jun. 2022.

AGUIAR, J. G.; CORREIA, P. R. M. Como fazer bons mapas conceituais? Estabelecendo parâmetros de referências e propondo atividades de treinamento. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 13, n. 2, p. 141-157, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4265>. Acesso em 16 nov. 2022.

AGUIAR, J. G.; CORREIA, P. R. M. From representing to modelling knowledge: Proposing a two-step training for excellence in concept mapping. **Knowledge Management & E-Learning**, v. 9, n. 3, p. 366-379, 2017.

AGUIAR, J. G.; CORREIA, P. R. M. Um novo olhar sobre a vida acadêmica: estudo de caso sobre as concepções de docentes. **Educação e Pesquisa**, v. 45, e193301, 2019. DOI: 10.1590/S1678-4634201945193301.

AGUIAR, J. G.; CORREIA, P. R. M. Using concept maps as instructional materials to foster the understanding of the atomic model and matter–energy interaction. **Chemistry Education Research and Practice**, n. 17, p. 756-765, 2016.

AKKUZU, N.; UYULGAN, M. A. An epistemological inquiry into organic chemistry education: exploration of undergraduate students' conceptual understanding of functional groups. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 17, p. 36-57, 2016. DOI: 10.1039/C5RP00128E.

ALVES, J. Q.; MARTINS, T. J.; ANDRADE, J. J. Documentos normativos e orientadores da educação básica: a nova BNCC e o ensino de química. **Currículo sem fronteiras**, v. 21, n. 1, p. 241-268, 2021. DOI: 10.35786/1645-1384.v21.n1.13.

ANDERSON, T.; SAUNDERS, G.; ALEXANDER, I. Alternative dissertation formats in education-based doctorates. **Higher Education Research & Development**, v. 41, n. 3, p. 593–612, 2022. DOI: 10.1080/07294360.2020.1867513.

ANDRADE, N. O. Modelos confeccionados em impressora 3D para o ensino de geometria molecular em química. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2019. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/571008>. Acesso em: 03 nov. 2022.

ARAÚJO, E. M. F. M. Desenvolvimento de aplicativos educacionais para química: ferramentas para o aprendizado de configuração eletrônica e geometria molecular. 2019. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2019. Disponível em: [https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/Elisson\\_Tese\\_Doutorado.pdf](https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2020/02/Elisson_Tese_Doutorado.pdf). Acesso em: 03 nov. 2022.

ARNAUD, A. A.; FERNANDEZ, C. Os currículos estaduais brasileiros e o conteúdo de química. In: 41º Encontro de Debates sobre o Ensino de Química, 2022, Rio Grande do Sul. **Anais eletrônicos** [...] Capão do Leão: EDEQ, 2022, p. 1 – 10. Disponível em: <https://edeq.com.br/submissao2/index.php/edeq/article/view/63>. Acesso em: 4 jan. 2023.

ASTOLFI, J. P.; DEVELAY, M. **A didática das ciências**. Campinas, SP: Papyrus, 1990.

AUSUBEL, D.P. **The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000.

BACEGA, T. Estrutura química para o 9º ano do ensino fundamental: uma proposta de ensino envolvendo tecnologia digital com vistas à aprendizagem significativa. 2020. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020. Disponível em: <http://tede.upf.br:8080/jspui/handle/tede/1957>. Acesso em: 03 nov. 2022.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Tradução Estela dos Santos Abreu – Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BALDOCK, B. L.; BLANCHARD, J. D.; FERNANDEZ, A. L. Student discovery of the relationship between molecular structure, solubility, and intermolecular forces. **J. Chem. Educ.**, v. 98, n. 12, p. 4046–4053, 2021. DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00851.

BALLEY, C. A. Concept mapping: A neuro-scientific approach. In: Midwest research-to-practice conference in adult, continuing, and community education. **Anais...** University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI, 2005.

BARNEA, N. Teaching and learning about chemistry and modelling with a computer managed modelling system. In: GILBERT, J. K.; BOULTER, C. J. (eds.). **Developing Models in Science Education**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000.

BARROS, A. P. M. Recursos didáticos para o ensino de geometria molecular a alunos cegos em classes inclusivas. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018. Disponível em: <http://tede.bc.uepb.edu.br/jspui/handle/tede/4137>. Acesso em: 03 nov. 2022.

BENT, H. A. An appraisal of valence-bond structures and hybridization in compounds of the first-row elements. **Chem. Rev.**, v. 61, p. 275–311, 1961. DOI: 10.1021/cr60211a005.

BERTALLI, J. G. Ensino de geometria molecular, para alunos com e sem deficiência visual, por meio de modelo atômico alternativo. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2010.

BIRK, J. P.; KURTZ, M. J. Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. **J. Chem. Educ.**, v. 76, n. 1, p. 124–128, 1999. DOI: 10.1021/ed076p124.

BISRA, K. **How learners visually navigate concept maps**: an analysis of eye movements. 2010. Dissertação (Mestrado em Educação) – Simon Fraser University, Vancouver, Canadá, 2010.

BITTAR, M. A teoria antropológica do didático como ferramenta metodológica para análise de livros didáticos. **Zetetike**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 364-387, 2017. DOI: 10.20396/zet.v25i3.8648640.

BOLTON, K. *et al.* SimChemistry as an active learning tool in chemical education. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 9, p. 2773–284, 2008. DOI: 10.1039/B812417P.

BOUZON, J. D. Metodologias didáticas alternativas para o ensino de geometria molecular e soluções: estratégias para a construção do conhecimento. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/4785>. Acesso em: 03 nov. 2022.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação (CNE). Parecer n. 15, de 1 de junho de 1998. **Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Brasília, DF, 1998.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base nacional comum curricular**: ensino médio. Brasília: MEC, 2018.

BRASIL. Ministério de Educação e Cultura. LDB - Lei nº 9394/96, de 20 de dezembro de 1996. **Estabelece as Diretrizes e Bases da Educação Nacional**. Brasília: MEC, 1996.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio**. Brasília: MEC; SEMTEC, 1999.

BROCKINGTON, G. **Neurociência e educação**: investigando o papel da emoção na aquisição e uso do conhecimento científico. 2011. P. 202. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BROWN, C. E. *et al.* Visualizing molecular structures and shapes: a comparison of virtual reality, computer simulation, and traditional modeling. **Chemistry Teacher International**, v. 3, n. 1, p. 69-80, 2020. DOI: 10.1515/cti-2019-0009.

BUCHNER, J.; KERRES, M. Media comparison studies dominate comparative research on augmented reality in education. **Computers & Education**, v. 195, p. 104711, 2023. DOI: 10.1016/j.compedu.2022.104711.

CAÑAS, A. J.; NOVAK, J. D. Re-Examining the foundations for effective use of concept maps. In: International Conference on Concept Mapping, 2, 2006. **Anais...** Costa Rica, 2006.

CAÑAS, A. J.; NOVAK, J. D.; REISKA, P. How good is my concept map? Am I a good Cmapper? **Knowledge Management & E-Learning**, v. 7, n. 1, p. 6–19, 2015.

CANE, E. C.; WILLIAMS, D. P. Prediction! The VSEPR game: using cards and molecular model building to actively enhance students' understanding of molecular geometry. **Journal of Chemical Education**, v. 95, n. 6, p. 991-995, 2018. DOI: 10.1021/acs.jchemed.7b00687.

CARILLO, L.; LEE, C.; RICKEY, D. Enhancing Science Teaching by doing MORE A framework to guide chemistry students' thinking in the laboratory. **Sci. Teach.**, v. 72, n. 7, p. 60–65, 2005.

CARLISLE, D.; TYSON, J.; NIESWANDT, M. Fostering spatial skill acquisition by general chemistry students. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 16, p. 478-517, 2015. DOI: 10.1039/C4RP00228H.

CARNEIRO, M. H. S. As imagens no livro didático. **In:** Iº Encontro nacional de pesquisa em ensino de ciências. Águas de Lindóia, SP, Atas do Iº Encontro nacional de pesquisa em ensino de ciências, p. 366-373, 1997.

CARVALHO, C. R. S. Software educativo: um instrumento para explorar conceitos nas representações simbólicas no ensino da geometria molecular. 2009. Dissertação (Mestrado) - Universidade Luterana do Brasil, Canoas, 2009.

CHEN, C. H.; HUANG, C. Y.; CHOU, Y. Y. Effects of augmented reality-based multidimensional concept maps on students' learning achievement, motivation and acceptance. **Univ Access Inf Soc**, v. 18, p. 257-268, 2019. DOI: 10.1007/s10209-017-0595-z.

CHEN, S.; LIU, S. Using augmented reality to experiment with elements in a chemistry course. **Computers in Human Behavior**, v. 111, 2020. DOI: 10.1016/j.chb.2020.106418.

CHEVALLARD, Y. Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique. **Recherches en Didactique des Mathématiques**, Grenoble, v. 12, n. 1, p. 73-112, 1992.

CHOU, Y. Y.; WU, P. F.; HUANG, C. Y. et al. Effect of digital learning using augmented reality with multidimensional concept map in elementary science course. **Asia-Pacific Edu Res**, v. 31, p. 383-393, 2022. DOI: 10.1007/s40299-021-00580-y.

CLAUSS, A. D. *et al.* Rabbit-ears hybrids, VSEPR sterics, and other orbital anachronisms. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 15, p. 417-434, 2014. DOI: 10.1039/C4RP00057A.

CODUTO, J. R.; LAZICKI, A.; LEDDY, J. Visualizing 3D objects in analytical chemistry. **Journal of Chemical Education**, v. 101, n. 1, p. 77-87, 2024. DOI: 10.1021/acs.jchemed.3c00821.

COLL, C. *et al.* **O construtivismo na sala de aula**. São Paulo: Ática, 2006.

COOPER, M. M.; GROVE, N.; UNDERWOOD, S. M. Lost in Lewis structures: An investigation of student difficulties in developing representational competence. **J. Chem. Ecol.**, v. 87, p. 869–874, 2010. DOI: 10.1021/ed900004y.

COOPER, M. M.; UNDERWOOD, S. M.; HILLEY, C. Z. Development and validation of the implicit information from Lewis structures instrument (IILSI): do students connect structures with properties? **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 13, p. 195–200, 2012. DOI: 10.1039/C2RP00010E.

CORREIA, P. R. M. ; CABRAL, G. C. P. ; AGUIAR, J. G. Cmaps with errors: Why not? comparing two cmap-based assessment tasks to evaluate conceptual understanding. In: International Conference on Concept Mapping, 7, 2016. **Anais...** New York: Springer, v. 1, p. 1-5, 2016.

CORREIA, P. R. M.; AGUIAR, J. G. Um treinamento em duas etapas visando à certificação de mapeadores excelentes: da representação à modelagem de conhecimento. In: **Innovating with Concept Mapping**. 2016. Springer International Publishing.

CORREIA, P. R. M.; CABRAL, G. C. P.; AGUIAR, J. G. Cmaps with errors: Why not? comparing two cmap-based assessment tasks to evaluate conceptual understanding. In: International Conference on Concept Mapping, 7, 2016. **Anais...** New York: Springer, v. 1, p. 1-5, 2016. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45501-3\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45501-3_1). Acesso em 16 nov. 2022.

COSENZA, R. M., GUERRA, L. B. **Neurociência e educação: como o cérebro aprende**. Porto Alegre: Artmed, 2011.

CRESWELL, J. W. **Investigação qualitativa e projeto de pesquisa: escolhendo entre cinco abordagens**. Porto Alegre, RS: Penso, 2014a.

CRESWELL, J. W. **Research design**: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. 4. ed. London: Sage Publications, 2014b.

DANIELA, L. Smart pedagogy as a driving wheel for technology-enhanced learning. **Tech. Know. Learn.**, v. 26, p. 711–718, 2021. DOI: 10.1007/s10758-021-09536-z

DANTAS, M. P.; SILVA, F. U. da; BORGES, J. C. da S. Uso dos mapas conceituais como ferramenta de avaliação qualitativa, com ênfase no ensino de Física. **HOLOS**, v. 3, p. 186–200, 2018.

DAVID, L.; WEINSTEIN, N. Using technology to make learning fun: technology use is best made fun and challenging to optimize intrinsic motivation and engagement. **Eur. J. Psychol. Educ.**, v. 39, 1441-1463, 2024. DOI: 10.1007/s10212-023-00734-0.

DECI, E. L.; RYAN, R. M. Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation. **American Psychologist**, v. 55, n. 1, p. 68-78, 2000. DOI: 10.1037/0003-066X.55.1.68.

DONAGHY, K. J.; SAXTON, K. J. Connecting geometry and chemistry: a three-step approach to three-dimensional thinking. **J. Chem. Educ.**, v. 89, n. 7, p. 917–920, 2012. DOI: 10.1021/ed200345w.

DOWNAR, J.; BHATT, M.; MONTAGUE, P. R. Neural Correlates of Effective Learning in Experienced Medical Decision-Makers. **PLOS One**, v. 6, n. 11, e27768, 2011.

DUKE, N. K.; BECK, S.W. Research news and comment: Education should consider alternative formats for the dissertation. **Educational Researcher**, v. 28, n. 3, p. 31-36, 1999. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1177255>. Acesso em: 02 jun 2024.

EILAM, B.; GILBERT, J. K. (Eds.). **Science teachers' use of visual representations**. Springer International Publishing, New York, 2014.

EISENKRAEMER, R. E.; JAEGER, A.; STEIN, L. M. A systematic review of the testing effect in learning. **Paidéia**, v. 23, n. 56, p. 397-406, 2013. DOI: 10.1590/1982-43272356201314.

FABRI, P. H. Estudo da motivação do estudante trabalhando com modelos moleculares concretos, validada por meio de vídeo e áudio. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016. Disponível em: <https://ead.uenf.br/moodle/mod/url/view.php?id=13658&lang=es>. Acesso em: 03 nov. 2022.

FERK, V. *et al.* Students' understanding of molecular structure representations. **International Journal of Science Education**, v. 25, n. 10, p. 1227-1245, 2003. DOI: 10.1080/0950069022000038231.

FIGURELLA, L.; MAYER, R. E. Eight ways to promote generative learning. **Educational Psychology Review**, v. 28, n. 4, p. 717-741, 2016. DOI: 10.1007/s10648-015-9348-9.

FIORI, N. **As neurociências cognitivas**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2008.

FOMBONA-PASCUAL, A.; FOMBONA, J.; VÁZQUEZ-CANO, E. VR in chemistry, a review of scientific research on advanced atomic/molecular visualization. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 23, p. 300-312, 2022. DOI: 10.1039/D1RP00317H.

FRIEDERICI, A. D. et al. The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: localizing syntactic and semantic processes. **Cerebral Cortex**, v. 13, p. 170-177, 2003.

GALL, D. *et al.* Embodiment in virtual reality intensifies emotional responses to virtual stimuli. **Front. Psychol.**, v. 12, art. 674179, 2021. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.674179.

GARCIA, P. S.; SÁ, I. R.; LIMA, M. I. B. Possibilidades de superação de desafios no ensino de Ciências: o caso dos Planos Nacional e Municipais de Educação. **REnCiMa**, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 388-406, abr./jun. 2020.

GAZZANIGA, M. S. et al. **Neurociência cognitiva: a biologia da mente**. Porto Alegre: Artmed, 2006.

GILBERT, J. K. Visualization: A metacognitive skill in science and science education. In: GILBERT, J. K. (Ed.). **Visualization in science education**. p. 9–27. Dordrecht: Springer, 2007.

GOBERT, J. D. Leveraging technology and cognitive theory on visualization to promote students' science. In: GILBERT, J. K. (Ed.). **Visualization in science education**. V. 1, p. 73–90. Dordrecht: Springer, 2005.

GODDARD, T. D. *et al.* Molecular visualization on the holodeck. **Journal of Molecular Biology**, v. 430, n. 21, p. 3982-3996, 2018. DOI: 10.1016/j.jmb.2018.06.040.

GUAY, R. B. **Purdue spatial visualization test**. West Lafayette: Purdue Research Foundation, 1976.

HARLE, M.; TOWNS, M. A. Review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instructions. **J. Chem. Educ.**, v. 88, p. 351-360, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed900003n>.

HATTIE, J. AC.; DONOGHUE, G. M. Learning strategies: a synthesis and conceptual model. **Science of Learning**, v. 1, n. 16013, p. 1-13, 2016.

HERON, M.; KINCHIN, I. M.; MEDLAND, E. Interview talk and the co-construction of concept maps. **Educational research**, v. 60, n. 4, p. 373-389, 2018. DOI: 10.1080/00131881.2018.1522963.

HEWSON, P. W. Conceptual change in science teaching and teacher education. National Center for Educational Research, Documentation, and Assessment, Madrid, Spain, 1992. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/253300170\\_Conceptual\\_change\\_in\\_science\\_teaching\\_and\\_teacher\\_education](https://www.researchgate.net/publication/253300170_Conceptual_change_in_science_teaching_and_teacher_education). Acesso em: 11 dez. 2022.

HIDI, S.; RENNINGER, K. A. The four-phase model of interest development. **Educational Psychologist**, v. 41, p. 111-127, 2006. DOI: 10.1207/s15326985ep4102\_4.

HODSON, D. Experiments in science and science teaching. **Educational Philosophy and Theory**, v. 20, n. 2, 53-66, 1988.

HUANG, C. F.; LIU, C. J. An event-related potentials study of mental rotation in identifying chemical structural formulas. **European Journal of Educational Research**, v. 1, n. 1, p. 37-54, 2012.

HURD, P. D. Scientific literacy: new mind for a changing world. **Science & Education**, Stanford, USA, n. 82, p. 407-416, 1998.

JOHNSON, J. A., ZATORRE, R. J. Neural substrates for dividing and focusing attention between simultaneous auditory and visual events. **Neuroimage**, v. 31, n. 4, p. 1673-1681, 2006.

JOHNSTONE, A. H. Macro- and Microchemistry. **Sch. Sci. Rev.**, v. 64, p. 377-379, 1982.

JOHNSTONE, A. H. The development of chemistry teaching. **The Forum**, v. 70, n. 9, 1993.

JOHNSTONE, A. H. Why is science difficult to learn? things are seldom what they seem. **J. Comput. Assist. Lear.**, v. 7, n. 2, p. 75-83, 1991. DOI: 10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x.

JOSHUA, S.; DUPIN, J. J. **Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques**. Paris: Presses Universitaires de France, 1993.

JUSTI, R.; GILBERT, J. K.; FERREIRA, P. F. M. The application of a 'model of modeling' to illustrate the importance of metavisualisation in respect of the three types of representation. In: GILBERT, J. K.; TREAGUST, D. F. (Eds.). **Multiple representations in chemical education**. p. 285-307. Dordrecht: Springer, 2009.

KALYUGA, S.; AYRES, P.; CHANDLER, P.; SWELLER, J. The expertise reversal effect. **Educational Psychologist**, 38, p. 23-31, 2003. DOI: 10.1207/S15326985EP3801\_4.

KANDEL, E. R. et al. **Princípios de neurociências**. 5ed. Brasil: MCGRAW-HILL, 2014.

KAPUR, M. Examining productive failure, productive success, unproductive failure, and unproductive success in learning. **Educational Psychologist**, v. 51, n. 2, p. 289-299, 2016.

KARONEN, M. *et al.* Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: the Lewis structure as an example. **Educ. Sci.**, 11, 258, 2021. DOI: 10.3390/educsci11060258.

KELLER, S.; RUMANN, S.; HABIG, S. Cognitive Load Implications for Augmented Reality Supported Chemistry Learning. **Information**, v. 12, art. 96, 2021. DOI: 10.3390/info12030096.

KHISHFE, R.; ABD-EL-KHALICK, F. Influence of explicit and reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders' views of nature of science. **J. Res. Sci. Teach.**, v. 39, p. 551-578, 2002. DOI: 10.1002/tea.10036.

KIERNAN, N. A.; MANCHES, A.; SEERY, M. K. The role of visuospatial thinking in students' predictions of molecular geometry. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 22, p. 626, 2021. DOI: 10.1039/d0rp00354a.

KINCHIN, I.; STREATFIELD, D.; HAY, D. Using concept mapping to enhance the research interview. **International Journal of Qualitative Methods**, London, v. 9, n. 1, p. 52-68, 2010. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/160940691000900106#:~:text=Concept%20mapping%20differs%20from%20traditional,perceived%20richness%20of%20interview%20data>. Acesso em 16 nov. 2022.

KIND, V. **Beyond appearances**: Students' misconceptions about basic chemical ideas. 2. ed. Durham: Durham University, 2004.

KITCHENHAM, B. A. **Procedures for performing systematic reviews**. Tech. Report TR/SE - 0401, Keele University, 2004.

KORAKAKIS, G.; PAVLATOU, E. A.; PALYVOS, J. A.; SPYRELLIS, N. 3D visualization types in multimedia applications for science learning: A case study for 8th grade students in Greece. **Computers & Education**, v. 52, n. 2, 2009, p. 390-401, 2009. DOI: 10.1016/j.compedu.2008.09.011.

KOZMA, R.; CHIN, E.; RUSSELL, J.; MARX, N. The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning. **J. Learn. Sci.**, v. 9, n. 2, p. 105-143, 2000.

KOZMA, R.; RUSSELL, J. Students becoming chemists: developing representational competence. In: GILBERT, J. (Ed.). **Visualization in Science Education**, p. 121-145, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005.

KRASILCHIK, M. Caminhos do ensino de ciências no Brasil. **Em Aberto**, Brasília, ano 11, n. 55, jul./set. 1992.

KULESZA, J.; DeHONDT II, G.; NEZLEK, G. More technology, less learning? **Information Systems Education Journal (ISEDJ)**, v. 9, n. 7, 2011. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1136848.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2024.

LAMOUREUX, G.; OGILVIE, J. F. Hybrid atomic orbitals in organic chemistry. Part 2: Critique of practical aspects. **Quim. Nova**, v. 42, n. 7, p. 1-6, 2019b. DOI: 10.21577/0100-4042.20170377.

LAMOUREUX, G.; OGILVIE, J. F. Orbitals in general chemistry, part I: The great debate. **Química Nova**. DOI: 10.2139/ssrn.3772421, 2019a.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. DOI: 10.2307/2529310.

LEAHY, W.; SWELLER, J. The imagination effect increases with an increased intrinsic cognitive load. **Applied Cognitive Psychology**, v. 22, n. 2, p. 273-283, 2008. DOI: 10.1002/acp.1373.

LENT, R. **Cem bilhões de neurônios**. 2ed. Rio de Janeiro: Atheneu, 2010.

LIMA, J. O. G.; ALMEIDA, G. B. Elaboração de holograma para o ensino de geometria molecular. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 10, n. 1, p. 73-87, 2020.

LIN, Y. I.; SON, J. Y.; RUDD II, J. A. Asymmetric translation between multiple representations in chemistry. **International Journal of Science Education**, v. 38, n. 4, 644-662, 2016. DOI: 10.1080/09500693.2016.1144945.

MAIA, N. C. Origami arquitetônico como recurso pedagógico para a compreensão da geometria espacial de moléculas. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/27707>. Acesso em: 03 nov. 2022.

MAKRANSKY, G.; PETERSEN, G. B. The cognitive affective model of immersive learning (CAMIL): A theoretical research-based model of learning in immersive virtual reality. **Educational Psychology Review**, v. 33, p. 937-958, 2021. DOI: 10.1007/s10648-020-09586-2.

MANFIO, R. A. Utilização e avaliação de software para geometria molecular no ensino médio. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019. Disponível em: <http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/572791>. Acesso em: 03 nov. 2022.

MARSON, G. A.; TORRES, B. B. Fostering multirepresentational levels of chemical concepts: a framework to develop educational software. **J. Chem. Educ.**, v. 88, n. 12, p. 1616–1622, 2011. DOI: 10.1021/ed100819u.

MARTINA, A. R. Supporting student's learning with multiple visual representations. In: HORVATH, J. C.; LODGE, J. M.; HATTIE, J. (Eds). **From the laboratory to the classroom: translating science of learning for teachers**. Cap. 9. 1ed. New York: Routledge, 2017.

MARTINS, M. G. Avaliação didática dos materiais alternativos no conteúdo de geometria molecular: uma proposta para o ensino de química. 2017. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://biblioteca.ifce.edu.br/mobile/detalhe.asp?codigo=75933&tipo=1&detalhe=1>. Acesso em: 03 nov. 2022.

MARTINS, M. G.; FREITAS, G. F. G.; VASCONCELOS, P. H. M. A utilização de materiais alternativos no ensino de química no conteúdo de geometria molecular. **Revista Thema**, v. 15, n. 1, p. 44-50, 2018. DOI: 10.15536/thema.15.2018.44-50.784.

MATLIN, M. W. **Psicologia Cognitiva**. 5ª ed. RJ: LTC Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2004.

MATTHEWS, M. R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7084/6555>. Acesso em: 06 jun. 2022.

MATTOX, A.; REISNER, B. A.; RICKEY, D. What happens when chemical compounds are added to water? An introduction to the Model-Observe-Reflect-Explain (MORE) thinking frame. **Journal of Chemical Education**, v. 83, n. 4, p. 622, 2006. DOI: 10.1021/ed083p622.

MAYER, R. E. Applying the science of learning: Evidence-based principles for the design of multimedia instruction. **American Psychologist**, v. 63, n. 8, p. 760-769, 2008. DOI: 10.1037/0003-066X.63.8.760.

MAYER, R. E. Cognitive Theory of Multimedia Learning. In: MAYER, R. (Ed). **Cambridge Handbook of Multimedia Learning**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

MAYER, R. E.; MAKRANSKY, G.; PARONG, J. The promise and pitfalls of learning in immersive virtual reality. **International Journal of Human-Computer Interaction**, v. 39, n. 11, p. 2229-2238, 2022. DOI: 10.1080/10447318.2022.2108563.

MÉTIOUI, A.; TRUDEL, L. Two-tier multiple-choice questionnaires to detect the students' misconceptions about heat and temperature. **European Journal of Mathematics and Science Education**, v. 6, n. 1, p. 23-34, 2021. DOI: 10.12973/ejmse.2.1.23.

MORTIMER, E. F.; SCOTT, P.; EL-HANI, C. N. Bases teóricas e epistemológicas da abordagem dos perfis conceituais. **TED: Tecné, Episteme y Didaxis**, n. 30, p. 111-125, 2011.

MOURA, J. A. S. A Realidade Virtual como uma ferramenta para o ensino da Geometria Molecular. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14438>. Acesso em: 03 nov. 2022.

MUTLU, A.; SESEN, B. A. Development of a two-tier diagnostic test to assess undergraduates' understanding of some chemistry concepts. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 174, p. 629-635, 2015. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.01.593.

NASCIMENTO, F.; FERNANDES, H. L.; MENDONÇA, V. M. O ensino de ciências no Brasil: história, formação de professores e desafios atuais. **Revista HISTEDBR On-line**, Campinas, n. 39, p. 225-249, 2010.

NETO, J. R. F. Tecnologias no ensino de geometria molecular. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17464/1/joao%20parte%201.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2022.

NISA, A. *et al.* The validity of molecular geometry based virtual reality to improve student visual-spatial intelligence in new normal era. **Journal of Educational Sciences**, v. 5, n. 3, p. 393-408, 2021.

NOVAK, J. D. **Learning, creating and using knowledge**: concept maps as facilitative tools in schools and corporations. 2a Ed. New York: Routledge. 2010.

OGDEN, M. An inquiry experience with high school students to develop an understanding of intermolecular forces by relating boiling point trends and molecular structure. **J. Chem. Educ.**, v. 94, p. 897–902, 2017. DOI: 10.1021/acs.jchemed.6b00697.

OLIVEIRA, J. A. B.; CAVALCANTE, P. S.; AQUINO, K. A. S. Mapas conceituais na avaliação da aprendizagem decorrente de sequências de ensino potencialmente significativas para o ensino de ciências. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 13, n. 1, p. 61-77, jan./abr. 2023. DOI: 10.31512/encitec.v13i1.1068.

ÖZMEN, H.; DEMIRCIOĞLU, H.; DEMIRCIOĞLU, G. The effects of conceptual change texts accompanied with animations on overcoming 11th grade students' alternative conceptions of chemical bonding. **Computers & Education**, v. 52, n. 3, p. 681-695, 2008. DOI: 10.1016/j.compedu.2008.11.017.

PEREIRA, S. S.; CUNHA, J. S.; LIMA, E. M. Estratégias didático-pedagógicas para o ensino-aprendizagem de genética. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 25, n. 1, p. 41-59, 2020. DOI: 10.22600/1518-8795.ienci2020v25n1p41.

PETERSON, R. F.; TREAGUST, D. F. Grade-12 students' misconceptions of covalent bonding and structure. **Journal of Chemical Education**, v. 66, n. 6, p. 459-460, 1989. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/280764894\\_Grade-12\\_students'\\_misconceptions\\_of\\_covalent\\_bonding\\_and\\_structure](https://www.researchgate.net/publication/280764894_Grade-12_students'_misconceptions_of_covalent_bonding_and_structure). Acesso em: 11 dez. 2022.

PETERSON, R. F.; TREAGUST, D. F.; GARNETT, P. J. Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade-11 and -12 students' concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 26, n. 4, p. 301-314, 1989. DOI: 10.1002/tea.3660260404.

PETERSON, R. F.; TREAGUST, D. F.; GARNETT, P. J. Identification of secondary students' misconceptions of covalent bonding and structure concepts using a diagnostic instrument. **Research in Science Education**, v. 16, p. 40-48, 1986. DOI: 10.1007/BF02356816.

POSNER, G. I. *et al.* Accommodation of a scientific conception: toward a theory of conceptual change. **Science Education**, v. 66, p. 211-27, 1982.

POSNER, M. I.; PETERSEN, S. E. The attention system of the human brain. **Annual Review of Neuroscience**, n. 13, 25-42, 1990.

POUW, W. ROP, G.; KONING, B.; PAAS, F. The cognitive basis for the split-attention effect. **Journal of Experimental Psychology-general**, v. 148, n. 11, p. 2058-2075, 2019. DOI: 10.1037/xge0000578

RAHMAWATI, Y.; DIANHAR, H.; ARIFIN, F. Analysing students' spatial abilities in chemistry learning using 3D virtual representation. **Educ. Sci.**, v. 11, p. 185, 2021. DOI: 10.3390/educsci11040185.

RAMOS, J. M.; IZOLANI, A. O.; TÉLLEZ, C. A.; SANTOS, M. J. G. O conceito de hibridização. **Química Nova na Escola**, n. 28, p. 24-27, 2008. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc28/06-CCD-5906.pdf>. Acesso em 16 nov. 2022.

REBER, A. S. **Implicit learning and tacit knowledge**: An essay on the cognitive unconscious. Oxford, U.K.: Oxford University Press, 1993.

RIBEIRO, R. D. R.; SUTÉRIO, G. M.; BASTOS, A. R. B. Geometria molecular acessível para alunos com deficiência visual. **Educação química em ponto de vista**, v. 2, n. 1, p. 161-172, 2018. DOI: 10.30705/eqpv.v2i1.1163.

ROCHA, N. M. *et al.* A realidade aumentada como recurso auxiliar para a aprendizagem significativa de geometria molecular. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e21710109027, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i10.9027.

SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, M. P. B. **Metodologia de pesquisa**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2013.

SANTOS, A. C. L. Ensino de geometria molecular com aplicativo de simulação digital: possíveis contribuições para uma aprendizagem significativa. 2019. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000229351&print=y>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SANTOS, D. G.; PAULETTI, F. Possibilidades de uso do software CMap Tools: construção de mapas conceituais para uma aprendizagem de funções inorgânicas. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 12, n. 2, p. 51-70, maio/ago. 2022. DOI: 10.31512/encitec.v12i2.737.

SANTOS, F. S. *et al.* Interlocução entre neurociência cognitiva e aprendizagem significativa: uma proposta teórica para o ensino de genética. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 149-182, 2016.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 1, p. 59-77, 2011.

SAVCHENKOV, A. V. Designing three-dimensional models that can be printed on demand and used with students to facilitate teaching molecular structure, symmetry, and related topics. **J. Chem. Educ.**, v. 97, p. 1682–1687, 2020. DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c00192.

SCHACTER, D. L., BUCKNER, R. L. Priming and the brain. **Neuron**, v. 20, n. 2, p. 185-195, 1998.

SCHNETZLER, R. P. A pesquisa em ensino de química no Brasil: conquistas e perspectivas. **Química Nova**, v. 25, n. 1, p. 14-24, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/qn/v25s1/9408.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2022.

SCHUNK, D. H.; DIBENEDETTO, M. K. Self-efficacy theory in education. In: WENTZEL, K. R.; MIELE, D. B. (Eds.). **Handbook of motivation at school**. New York, NY: Routledge, 2016. p. 34-54.

SEBATA, C. E. Aprendendo a imaginar moléculas: uma proposta de ensino de geometria molecular. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/6442>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SEQUEIRA, M. J. C. Contributos e limitações da teoria de Piaget para a educação em ciências. **Revista Portuguesa de Educação**, v. 3, n. 2, p. 21-35, 1990.

SIKL, R. *et al.* Who benefits and who doesn't in virtual reality learning: An experimental study comparing two types of school. *Journal of Computer Assisted Learning*, p. 1-14, 2024. DOI: [doi.org/10.1111/jcal.12973](https://doi.org/10.1111/jcal.12973).

SILVA, A. P. M. Geometria molecular: elaboração, aplicação e avaliação de uma sequência didática envolvendo o lúdico. 2016. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/5030>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SILVA, C. S. O Jogo e a teoria do processamento da informação no ensino de geometria molecular. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/10623>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SILVA, C. S.; SOARES, M. H. F. B. GeomeQuímica: um jogo baseado na Teoria Computacional da Mente para a aprendizagem de conceitos de geometria molecular. **Quím. nova esc.**, São Paulo, v. 43, n. 4, p. 371-379, 2021. DOI: 10.21577/0104-8899.20160265.

SILVA, E. A. SisMol3D: desenvolvimento de um Software Educacional para o ensino de estruturas moleculares em química. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2014. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4816>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SILVA, K. S. A neurociência cognitiva como base da aprendizagem de geometria molecular: um estudo sobre atributos do funcionamento cerebral relacionados à memória de longo prazo. 2018. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/8229>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SILVA, K. S. *et al.* Proposta de análise praxeológica de noções de química em documentos oficiais e livros didáticos. **Ciência & Educação**, v. 26, e20012, 2020. DOI: 10.1590/1516-731320200012.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. M. Perspectiva docente acerca da aprendizagem de geometria molecular: análise de entrevista mediada com mapa conceitual. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 14, n. 1, p. 82-97, 2024. DOI: 0.31512/encitec.v14i1.1099.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Aprimorando a percepção espacial em geometria molecular através do estudo com mapas conceituais e tecnologia de realidade aumentada. **ALEXANDRIA: R. Educ. Ci. Tec.**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 335-353, 2023b. DOI: 10.5007/1982-5153.2023.e 91971.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 23, e42082, p. 1-21, 2023a. DOI: 10.28976/1984-2686rbpec2023u579599.

SILVA, K. S.; FONSECA, L. S. Neurociência e educação: estratégias multissensoriais para a aprendizagem de geometria molecular. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 26, n. 01, p. 01-26, 2021. DOI: 10.22600/1518-795.ienci2021v26n1p01.

SILVA, K. S.; FONSECA, L. S.; CORREIA, P. R. M. Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 13, n. 2, p. 247-268, 2020. DOI: 10.3895/rbect.v13n2.9421.

SILVA, K. S.; FONSECA, L. S.; FREITAS, J. D. Uma breve história da geometria molecular sob a perspectiva didático-epistemológica de Guy Brousseau. **Acta Scientiae**, v. 20, n. 4, p. 626-647, 2018. DOI: 10.17648/acta.scientiae.v20iss4id3716.

SOEHARTO, S. *et al.* Review of students' common misconceptions in science and their diagnostic assessment tools. **Jurnal Pendidikan IPA Indonesia**, v. 8, n. 2, p. 247-266, 2019. DOI: 10.15294/jpii.v8i2.18649.

SORBY, S. Educational Research in Developing 3-D Spatial Skills for Engineering Students. **Int. J. Sci. Educ.**, v. 31, n. 3, p. 459-480, 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/09500690802595839?src=getftr>. Acesso em: 29 abr. 2024.

STEVENS, C.; BAVELIER, D. The role of selective attention on academic foundations: A cognitive neuroscience perspective. **Developmental Cognitive Neuroscience**, 1, 30-48, 2011.

STOWE, R. L.; HERRINGTON, D. G.; MCKAY, R. L.; COOPER, M. M. The impact of core-idea centered instruction on high school students' understanding of structure–property relationships. **Journal of Chemical Education**, v. 96, n. 7, p. 1327-1340, 2019. DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00111.

SUBRAMANIAN, N.; FILHO, A. V. M.; SALDANHA, T. C. B. Tópicos em ligação química II – Sobre o mérito da regra do octeto. **Química Nova**, v. 12, n. 3, p. 285-291, 1989. Disponível em: [http://quimicanova.s bq.org.br/detalhe\\_artigo.asp?id=3416](http://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=3416). Acesso em 16 nov. 2022.

SUMMERFIELD, C., EGNER, T. Expectation (and attention) in visual cognition. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 13, n. 9, p. 403-409, 2009.

SURI, N. A.; AZHAR, M. Description of senior high school students' understanding categories about chemical bonds using two-tier multiple choice diagnostic instrument. **International Journal of Progressive Sciences and Technology**, v. 21, n. 1, p. 26-34, 2020. Disponível em: <https://ijpsat.es/index.php/ijpsat/article/download/1847/1036>. Acesso em: 11 dez. 2022.

SWELLER, J. Cognitive Load Theory. In: SWELLER, J.; AYRES, P. L.; KALYUGA, S. (Orgs.). **Psychology of Learning and Motivation**. Cap. 2. New York: Springer, p. 37–76, 2011.

SWELLER, J.; VAN MERRIENBOER, J. J. G.; PAAS, F. G. W. C. Cognitive architecture and instructional design. **Educational Psychology Review**, v. 10, n. 3, p. 251-296, 1998.

TAAGEPERA, M. *et al.* Integrating symmetry in stereochemical analysis in introductory organic chemistry. **Chem. Educ. Res. Pract.**, v. 12, p. 322-330, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1039/C1RP90039K>.

UTTAL, D. H. *et al.* The malleability of spatial skills: a meta-analysis of training studies. **Psychol Bull.**, v. 139, n. 2, p. 352-402, mar. 2013. DOI: 10.1037/a0028446.

UYULGAN, M. A.; AKKUZU, N.; ALPAT, S. Assessing the students' understanding related to molecular geometry using a two-tier diagnostic test. **Journal of Baltic Science Education**, v. 13, n. 6, p. 839-855, 2014.

VERDI, M. P. *et al.* Organized Spatial Displays and Texts: Effects of Presentation Order and Display Type on Learning Outcomes. **The Journal of Experimental Education**, v. 65, n. 4, p. 303-317, 1997.

WONG, C. H. S.; TSANG, K. C. K.; CHIU, W.-K. Using augmented reality as a powerful and innovative technology to increase enthusiasm and enhance student learning in higher education chemistry courses. **Journal of Chemical Education**, v. 98, n. 11, p. 3476-3485, 2021. DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c01029.

WRIGHT, R.; THOMPSON, W. L.; GANIS, G.; NEWCOMBE, N. S.; KOSSLYN, S. M. Training generalized spatial skills. **Psychonomic Bulletin & Review**, v. 15, n. 4, p. 763-771, 2008.

YOON, S. Y. Psychometric properties of the revised Purdue spatial visualization tests: visualization of rotations. 2011. Tese (Doutorado) - Purdue University, West Lafayette, IN.

ZARPELON, E.; RESENDE, L. M. M.; PINHEIRO, N. A. M. Uso de mapas conceituais na disciplina de Cálculo Diferencial 1: uma estratégia em busca da aprendizagem significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Tecnologia**, v. 8, n. 2, p. 176-194, 2015.

ZHANG, L.; LIU, G. A Review of Factors Affecting Cognitive Load in Immersive Virtual Learning Environment. In: IEEE 12th International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT), Chongqing, China, 2023, p. 48-52, DOI: 10.1109/ICEIT57125.2023.10107848.

ZIMMERMAN, B. J. Becoming a self-regulated learner: An overview. **Theory Into Practice**, v. 41, p. 64-70, 2002.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido aos Pais e Termo de Assentimento Livre e Esclarecido (Universidade de São Paulo)

#### **Termo de Consentimento Livre e Esclarecido aos Pais**

Seu filho(a) está sendo convidado(a) a participar da pesquisa “RECURSOS VISUOESPACIAIS E REALIDADE AUMENTADA EM MAPAS CONCEITUAIS COMO ESTÍMULOS ATENCIONAIS PARA A APRENDIZAGEM DE QUÍMICA”

Os objetivos deste estudo é analisar os efeitos de mapas conceituais com indicadores visuoespaciais sobre o engajamento atencional do estudante e a aprendizagem de conceitos químicos.

Caso você autorize, seu filho(a) irá responder questionários de levantamento de conhecimentos sobre geometria molecular e participará de uma intervenção didática com duração de 2 horas, no horário de aula da disciplina de Química Geral, do curso superior de biotecnologia da USP-Leste (EACH). A participação dele(a) não é obrigatória e, a qualquer momento, poderá desistir da participação. Tal recusa não trará prejuízos em sua relação com o pesquisador ou com a instituição em que ele estuda.

Caso a pesquisa cause qualquer desconforto emocional e/ou de possíveis riscos psicossociais (ex.: constrangimento, intimidação, angústia, insatisfação, irritação, mal-estar etc.) ao participante, este pode abster-se de responder aos questionamentos sem qualquer ônus para a pesquisa.

Tudo foi planejado para minimizar os riscos da participação dele(a), porém se ele(a) optar, poderá interromper a participação e, se houver interesse, conversar com o pesquisador sobre o assunto. Haverá um risco mínimo de exposição dos dados do estudante, para evitar essa exposição, será realizada uma pesquisa priorizando o anonimato dos participantes na pesquisa durante a coleta, tratamento dos dados e divulgação dos resultados da pesquisa.

Você ou seu filho(a) não receberá remuneração pela participação. A participação dele(a) poderá contribuir para o planejamento das atividades de ensino, pesquisa e extensão da instituição. Como benefício, o participante terá acesso a uma metodologia de ensino e aprendizagem inovadora, contribuindo para a sua aprendizagem durante as atividades da pesquisa. Você está recebendo duas vias deste termo para assinatura, sendo uma via para você e outra para o pesquisador. Nesse termo consta o telefone do pesquisador principal e você pode tirar dúvidas a qualquer momento.

Em conformidade com o projeto de pesquisa, a aplicação das atividades está prevista para ser realizada em substituição a duas horas/aula, as quais serão cedidas pelo professor Dr. Paulo Correia, responsável pela disciplina Química Geral do curso de Biotecnologia (EACH-USP) e orientador deste projeto de doutorado. Em caso de necessidade de remanejamento das atividades para horário incompatível ao da disciplina citada, e em comum acordo com os participantes da pesquisa, será

garantido ressarcimento para despesas com transporte e alimentação para aqueles que precisarem se deslocar e/ou fazer refeições extras em decorrência da pesquisa. O participante também tem o direito de buscar qualquer tipo de assistência física e psicológica relacionada à sua participação na pesquisa, incluindo pedido de indenização, a partir dos contatos do pesquisador responsável e do Comitê de Ética em Pesquisa da EACH.

Este termo está de acordo com as normas da Resolução CNS N° 510/2016.

Caso haja alguma dúvida ou consideração a ser realizada, o participante poderá entrar em contato com o pesquisador responsável pelo e-mail: xxxxx@hotmail.com ou pelo contato telefônico: xxxxx.

Eu, \_\_\_\_\_ (colocar o nome do pai/mãe/responsável) declaro que entendi os objetivos, riscos e benefícios da participação do meu filho(a) \_\_\_\_\_ (colocar o nome do filho(a)) sendo que:

(    ) aceito que ele(a) participe    (    ) não aceito que ele(a) participe

São Paulo, ..... de ..... de .....

Assinatura do pesquisador responsável – Kleyfton Soares da Silva

Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH-USP)  
Rua Arlindo Béttio, 1000 - Ermelino Matarazzo, São Paulo - SP, 03828-000.  
Telefone: (11) 3091-1046  
Email CEP: cep-each@usp.br  
Atendimento:  
– Segundas às sextas-feiras: das 09:00 às 11:00 e das 14:00 às 16:00  
Localização: Prédio I1 | Sala T14

## **Termo de Assentimento Livre e Esclarecido**

Olá, Estudante!

Você está sendo convidado(a) a participar como voluntário(a) do projeto de pesquisa “RECURSOS VISUOESPACIAIS E REALIDADE AUMENTADA EM MAPAS CONCEITUAIS COMO ESTÍMULOS ATENCIONAIS PARA A APRENDIZAGEM DE QUÍMICA” sob responsabilidade do pesquisador Kleyfton Soares da Silva.

Os objetivos deste estudo é analisar os efeitos de mapas conceituais com indicadores visuoespaciais sobre o engajamento atencional do estudante e a aprendizagem de conceitos químicos.

Caso você queira participar, você rá responder questionários de levantamento de conhecimentos sobre geometria molecular e participará de uma intervenção didática com duração de 2 horas, no horário de aula da disciplina de Química Geral, do curso superior de biotecnologia da USP-Leste (EACH). A sua participação não é obrigatória e, a qualquer momento, poderá desistir da participação. Tal recusa não trará prejuízos em sua relação com o pesquisador ou com a instituição em que ele estuda.

Caso a pesquisa te cause qualquer desconforto emocional e/ou de possíveis riscos psicossociais (ex.: constrangimento, intimidação, angústia, insatisfação, irritação, mal-estar, etc.), você pode abster-se de responder aos questionamentos sem qualquer impedimento.

Tudo foi planejado para minimizar os riscos da sua participação, porém se você optar, poderá interromper a participação e, se houver interesse, conversar com o pesquisador sobre o assunto. Haverá um risco mínimo de exposição dos dados do estudante, mas para evitar essa exposição será realizada uma pesquisa priorizando o anonimato dos participantes durante a coleta, tratamento dos dados e divulgação dos resultados da pesquisa. Os dados serão utilizados única e exclusivamente pelo pesquisador responsável, sendo mantido o anonimato do aluno.

Você será convidado a participar de fotografias relacionadas às questões discutidas pela pesquisa, não sendo, pois, realizados registros de sua imagem pessoal. Durante os momentos de observação, havendo desconforto, as fotos serão suspensas assim que solicitado por você. Você também possui a salvaguarda da confidencialidade, sigilo e privacidade dos dados informados, seja de forma escrita ou eletrônica.

Os resultados obtidos poderão ser divulgados em publicações científicas relacionadas à pesquisa, mas você não será identificado. Você possui, a qualquer tempo, o direito ao acesso às informações sobre procedimentos e benefícios relacionados à pesquisa, inclusive para que sejam prestados os esclarecimentos que se fizerem necessários.

Você não receberá remuneração pela participação. A sua participação poderá contribuir para o planejamento das atividades de ensino, pesquisa e extensão da instituição. Como benefício, você terá

acesso a uma metodologia de ensino e aprendizagem inovadora, contribuindo para a sua aprendizagem durante as atividades da pesquisa. Você está recebendo duas vias deste termo para assinatura, sendo uma via para você e outra para o pesquisador. Nesse termo consta o telefone do pesquisador principal e você pode tirar dúvidas agora ou a qualquer momento.

Em conformidade com o projeto de pesquisa, a aplicação das atividades está prevista para ser realizada em substituição a duas horas/aula, as quais serão cedidas pelo professor Dr. Paulo Correia, responsável pela disciplina Química Geral do curso de Biotecnologia (EACH-USP) e orientador deste projeto. Em caso de necessidade de remanejamento das atividades para horário incompatível ao da disciplina citada, e em comum acordo com os participantes da pesquisa, será garantido ressarcimento para despesas com transporte e alimentação para aqueles que precisarem se deslocar e/ou fazer refeições extras em decorrência da pesquisa. Você também tem o direito de buscar qualquer tipo de assistência física e psicológica relacionada à sua participação na pesquisa, incluindo pedido de indenização, a partir dos contatos do pesquisador responsável e do Comitê de Ética em Pesquisa da EACH.

Este termo está de acordo com as normas da Resolução CNS Nº 510/2016.

Caso haja alguma dúvida ou consideração a ser realizada, o participante poderá entrar em contato com o pesquisador responsável pelo e-mail: xxxxx@hotmail.com ou pelo contato telefônico: xxxxxx.

Eu, \_\_\_\_\_ (colocar o nome do participante)  
declaro que entendi os objetivos, riscos e benefícios da minha participação, sendo que: (     ) aceito participar  
(     ) não aceito participar

São Paulo, ..... de ..... de .....

Assinatura do pesquisador responsável – Kleyfton Soares da Silva

Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH-USP)

Rua Arlindo Béttio, 1000 - Ermelino Matarazzo, São Paulo - SP, 03828-000.

Telefone: (11) 3091-1046

Email CEP: cep-each@usp.br

Atendimento:

– Segundas às sextas-feiras: das 09:00 às 11:00 e das 14:00 às 16:00

Localização: Prédio II | Sala T14

## APÊNDICE B – Participant information sheet and consent form (University of Surrey)

### **Participant Information Sheet: Version 2 – 21/08/2023**

Project Title: CMAP-VR: Concept Map and Virtual Reality as Educational Tools to Enhance 3D Visualisation in Science

University of Surrey Ref: 1046015-1045997-115144310 (SAGE-HDR)

#### **Introduction**

We would like to invite you to participate in this research project. You should only participate if you want to; choosing not to take part will not disadvantage you in any way. Before you decide whether you want to take part, it is important for you to understand why the research is being done and what your participation will involve. If you have any questions, you can contact us using the contact details at the end of this information sheet.

This study is being conducted by PhD student Kleyfton Soares at University of São Paulo in collaboration with Prof. Emily Farran at the University of Surrey.

#### **What is the purpose of the study?**

Our study explores the connection between molecular structure knowledge and spatial skills. A dynamic instructional intervention activity has been structured to assess its effectiveness in the learning of students with both low and high chemistry previous knowledge.

#### **Why have I been invited to take part?**

Open to students aged 18 or older, this study aims to enhance secondary school chemistry education using your insights. You were chosen for your prior exposure to molecular structure content, which can help us understand how students remember and forget scientific concepts. You don't need to know the content, as you will have the opportunity to learn it interactively during the pedagogical intervention activity.

### **Do I have to take part? and what will happen to me if I decide to take part?**

Participation is voluntary, and you can opt out without consequences. You can request data withdrawal within one month after participation. If you choose to participate, you'll provide basic information (age) and complete a 50-minute research activity.

Part 1 (20 minutes): Quiz on basic molecular geometry knowledge and mental rotation test,

Part 2 (20 minutes): Didactic intervention using interactive and dynamic materials.

Part 3 (10 minutes): Quiz on molecular geometry knowledge and satisfaction questionnaire.

### **What are the possible benefits in taking part? Are there any potential risks involved?**

We expect you'll find the study enjoyable. It will enhance understanding of spatial ability and molecular structure learning. Afterward, you'll receive a summary of the findings. While the tasks are designed to be fun, some may be challenging, but you can take breaks or stop at any time. Use of VR equipment is limited to people that are not pregnant and do not have any of the following health conditions: a history of photo-sensitive epileptic, epileptic seizure, heart attack, strokes, aneurysms, asthma attack, uncontrolled high blood pressure; a current contagious skin condition; a current significant sight impairment; a current impairment to balance.

### **Will my participation be kept confidential?**

Your participation and data will remain confidential and secure. The University of Surrey and regulators may review your information for monitoring and audit purposes while maintaining confidentiality.

### **What if there is a problem?**

Any complaint or concern about any aspect of the way you have been dealt with during the course of the study will be addressed; please contact Kleyfton Soares (xxxxx@surrey.ac.uk) in the first instance. You may also contact Professor Roi Cohen-Kadosh, Head of School (xxxxx@surrey.ac.uk).

The University of Surrey holds insurance policies which apply to this study. If you experience

harm or injury as a result of taking part in this study, you will be eligible to claim compensation. This does not affect your legal rights to seek compensation.

### **How is the project being funded?**

This research is part of ongoing research conducted by the Concept Maps Research Group (director: Prof. Paulo Correia) and the CoGDeV lab (lab director, Prof. Emily Farran).

### **Who has reviewed this study?**

This study has been granted exemption from ethics committee submission as it poses no risk according to the Self-Assessment for Governance and Ethics - Human and Data Research (SAGE-HDR).

### **Who is handling my data?**

The University of Surrey, as the sponsor, will act as the 'Data Controller' for this study. We will process your personal data on behalf of the controller and are responsible for looking after your information and using it properly. This information will include your name, date of birth, gender, education level, email which is regarded as 'personal data'. We will use your data as explained in the 'What is the purpose of the study' section above.

### **What will happen to my data?**

What will happen to my data? As a publicly-funded organization, we handle your personal data with fairness and legality in the public interest when you participate in our research. We retain project data for at least 6 years and research data for 10 years. Your personal data is treated with the utmost confidentiality and in compliance with data protection regulations. While your rights to access, change, or move your information are limited for research reliability, you can request data withdrawal by contacting the researchers. Once the study is completed, data withdrawal may not be possible. We prioritize using the minimum personally identifiable information required. Learn more about how we use your information at [<https://www.surrey.ac.uk/information-management/data-protection>] or contact

dataprotection@surrey.ac.uk for details.

### **What will happen to the results of the study?**

A final report summarising the main findings will be sent to all participants (on request). The research findings will also be disseminated through publication and conferences. Anonymised data will be deposited or submitted to an open source online research data repository at the end of the study. These data may be used for future research.

### **Will my data be shared or used in future research studies?**

When you participate in a research study, your information may be shared as anonymized data with researchers from various organizations, both locally and internationally, all dedicated to research in the public interest. This data will not identify you and won't be used to contact you or affect you in any way. It won't influence future services or decisions about you, like insurance. After the study, anonymous research data will be stored in an open-source online research data repository.

### **What if I want to complain about the way data is handled?**

If you wish to raise a complaint on how we have handled your personal data, you can contact our Data Protection Officer who will investigate the matter. If you are not satisfied with our response or believe we are processing your personal data in a way that is not lawful you can complain to the Information Commissioner's Office (ICO) (<https://ico.org.uk/>). For contact details of the University of Surrey's Data Protection Officer please visit:

<https://www.surrey.ac.uk/information-management/data-protection>

### **Limits to confidentiality**

Confidentiality will be respected unless there are compelling and legitimate reasons for this to be breached. If this was the case, we would normally inform you first of any decisions that might limit confidentiality.

**Who should I contact for further information?**

If you have any questions or require more information about this study, please contact the research team using the following contact details:

Kleyfton Soares

Visiting postgraduate researcher at University of Surrey School of Psychology

Guildford Surrey GU2 7XH

xxxxx@surrey.ac.uk

Thank you for reading this information sheet and for considering taking part in this research.

## Consent form

Project Title: CMAP-VR: Concept Map and Virtual Reality as Educational Tools to Enhance 3D Visualisation in Science

University of Surrey Ref: 1046015-1045997-115144310 (SAGE-HDR)

### Introduction

This study is being conducted by PhD candidate Kleyfton Soares (University of São Paulo, Brazil) in collaboration with Prof. Emily Farran at the University of Surrey.

If you have read the information sheet and you are happy to take part in the research project, please complete the following consent form by clicking on the Yes or No response buttons.

\*\*\*\*\*

I confirm that I have read and understood the information sheet dated (Version 2 – 21/08/2023) for the above study. I have had the opportunity to consider the information and asked questions which have been answered satisfactorily.

Yes

No

I understand that my participation is voluntary and that I am free to withdraw at any time during the study without giving any reason. In such an event, all collected data will be promptly erased.

Yes

No

I understand that information I provide may be subject to review by responsible individuals from the University of Surrey and/or regulators for monitoring and audit purposes.

Yes

No

I understand that anonymised information I provide will be used in various anonymised outputs, including publications.

Yes

No

I understand that my personal data, including this consent form, which link me to the research data, will be kept securely in accordance with data protection guidelines, and only be accessible to the immediate research team or responsible persons at the University.

Yes

No

I understand any personal details collected about me will not be shared beyond the study team.

Yes

No

I give permission for my de-identified data to be archived in an open-source online research data repository and shared anonymously with other researchers, in order to carry out future research.

Yes

No

I agree to take part in this study.

Yes

No

Date:

Code provided by the researcher:

Date of Birth:

Gender:

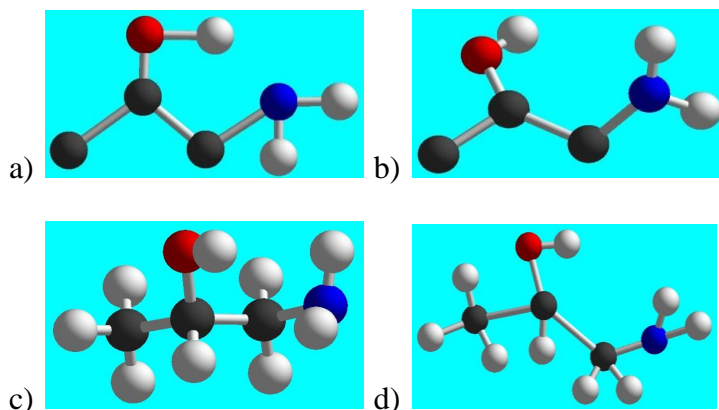
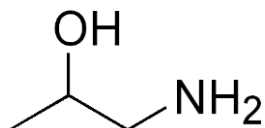
I agree for the researchers to contact me to provide me with a study results summary (If yes, please provide contact details)

Yes, by email \_\_\_\_\_

No

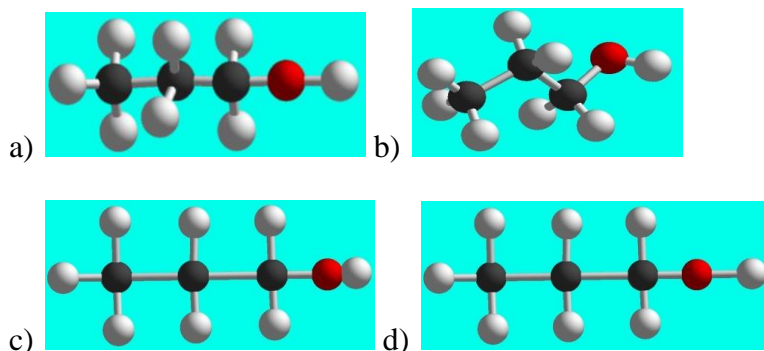
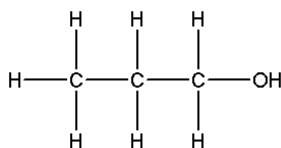
APÊNDICE C – Teste diagnóstico de dois níveis (*two-tier*) – Pré-teste do estudo I e II

1) Qual é a forma mais coerente para representar a molécula abaixo em 3 dimensões (3D)?



2) *Explique com o máximo de detalhes o motivo pelo qual você escolheu essa alternativa.*

3) Qual é a forma mais coerente para representar a molécula abaixo em 3 dimensões (3D)?



4) *Explique com o máximo de detalhes o motivo pelo qual você escolheu essa alternativa.*

5) Dadas as representações abaixo, assinale as geometrias das moléculas CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O:



- a) angular e linear.
- b) linear e angular.
- c) dobrada e reta.
- d) reta e dobrada.
- e) nenhuma das alternativas.

6) Por que as duas moléculas acima apresentam geometrias diferentes se ambas possuem um átomo central ligado a mais dois átomos?

7) As moléculas XeF<sub>4</sub> e CH<sub>4</sub> apresentam, respectivamente, as geometrias:

- a) tetraédrica e quadrática plana.
- b) quadrática plana e tetraédrica.
- c) tetraédrica e tetraédrica.
- d) quadrática plana e quadrática plana.

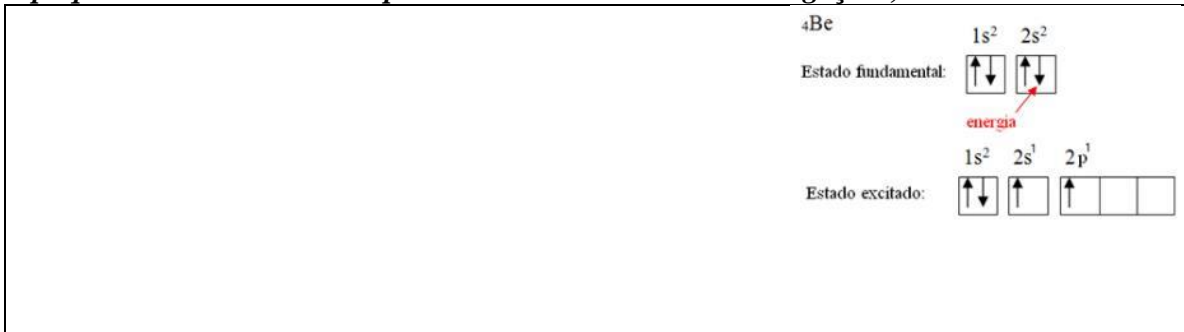
- Desenhe as estruturas de Lewis das duas moléculas acima (ex. H<sub>2</sub> = H••H).

8) Depois indique se as moléculas desenhadas são polares ou apolares. Justifique.

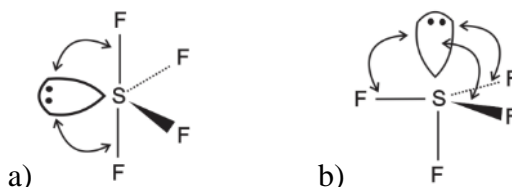
9) As geometrias do BeH<sub>2</sub> e do SF<sub>2</sub> são, respectivamente,

- a) Linear e Angular
- b) Angular e Linear
- c) Angular e Angular
- d) Linear e Linear

10) Quando feita a distribuição eletrônica do Berílio (Be) percebe-se que, no estado fundamental, o subnível  $2s^2$  fica completamente preenchido. Considere a figura abaixo e explique em detalhes como é possível o Be estabelecer duas ligações, como no caso do  $BeH_2$ .

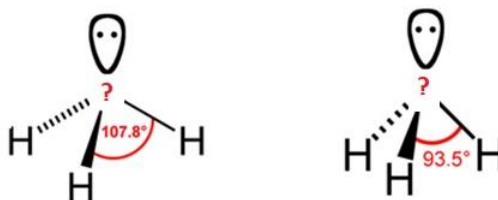


11) Qual das duas representações espaciais abaixo melhor representa a molécula  $SF_4$ ?



12) Justifique sua resposta:

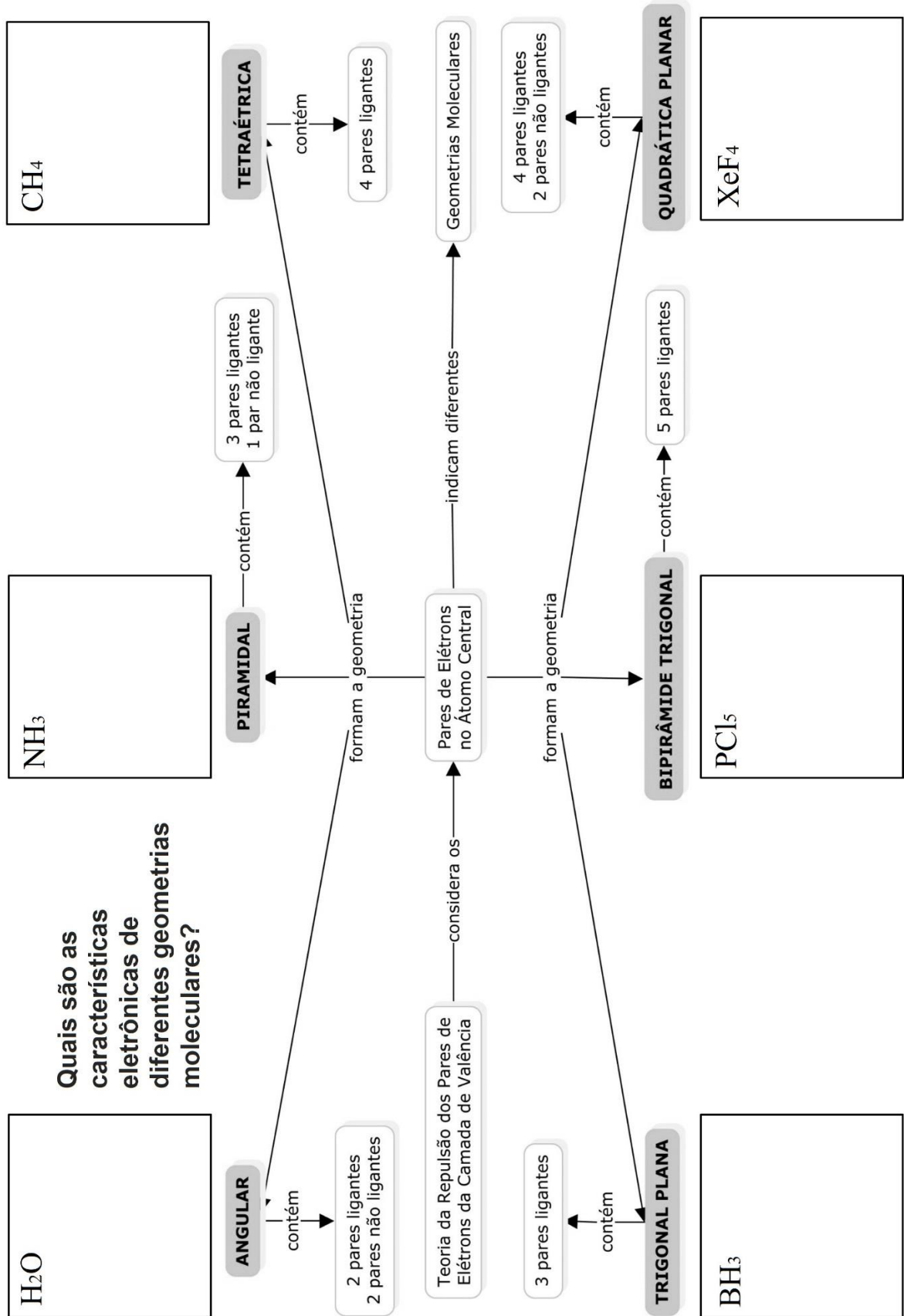
13) As interrogações podem ser substituídas, respectivamente, pelos átomos:



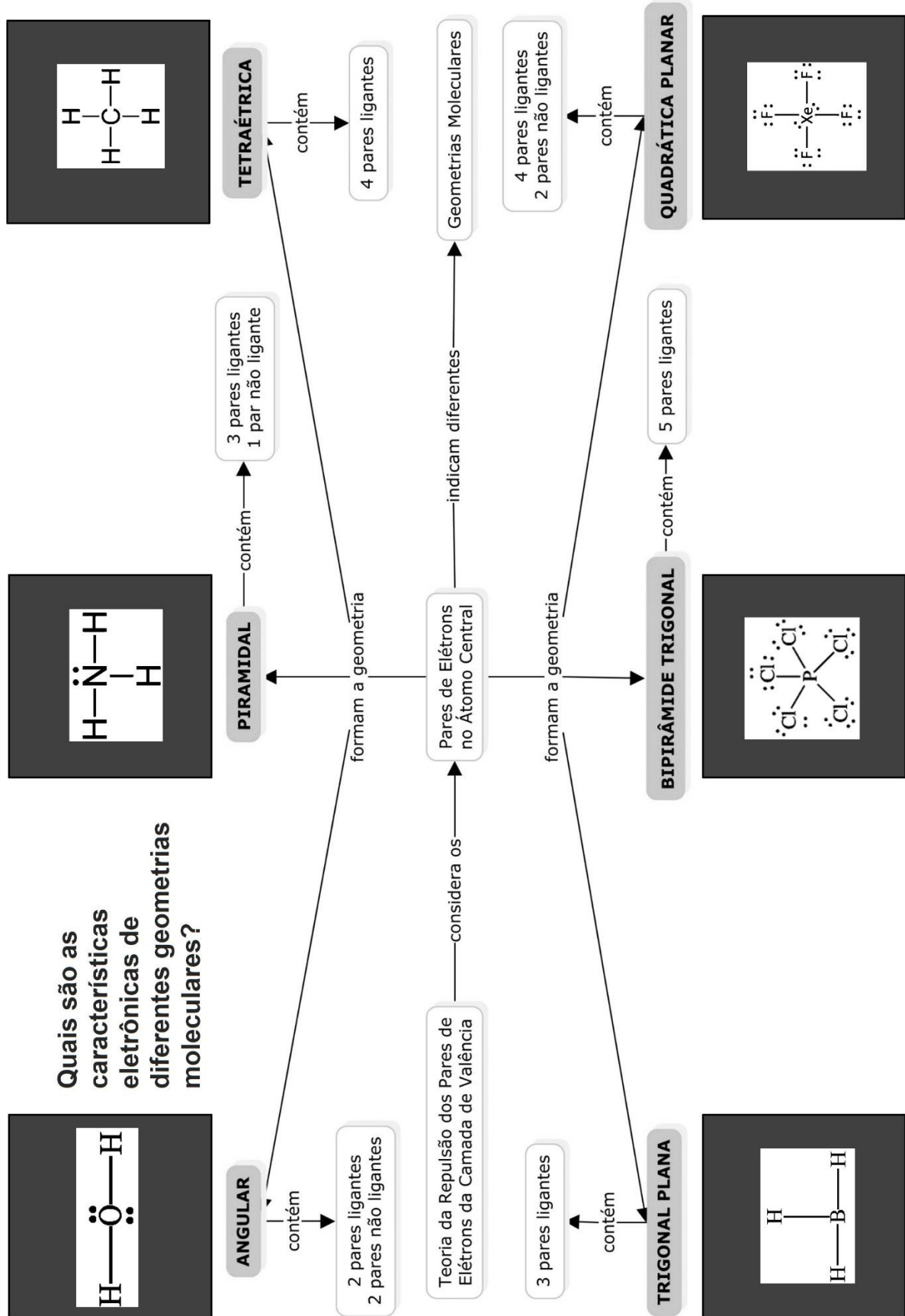
- a) N e P
- b) P e N
- c) nenhuma das alternativas

14) Justifique sua resposta:

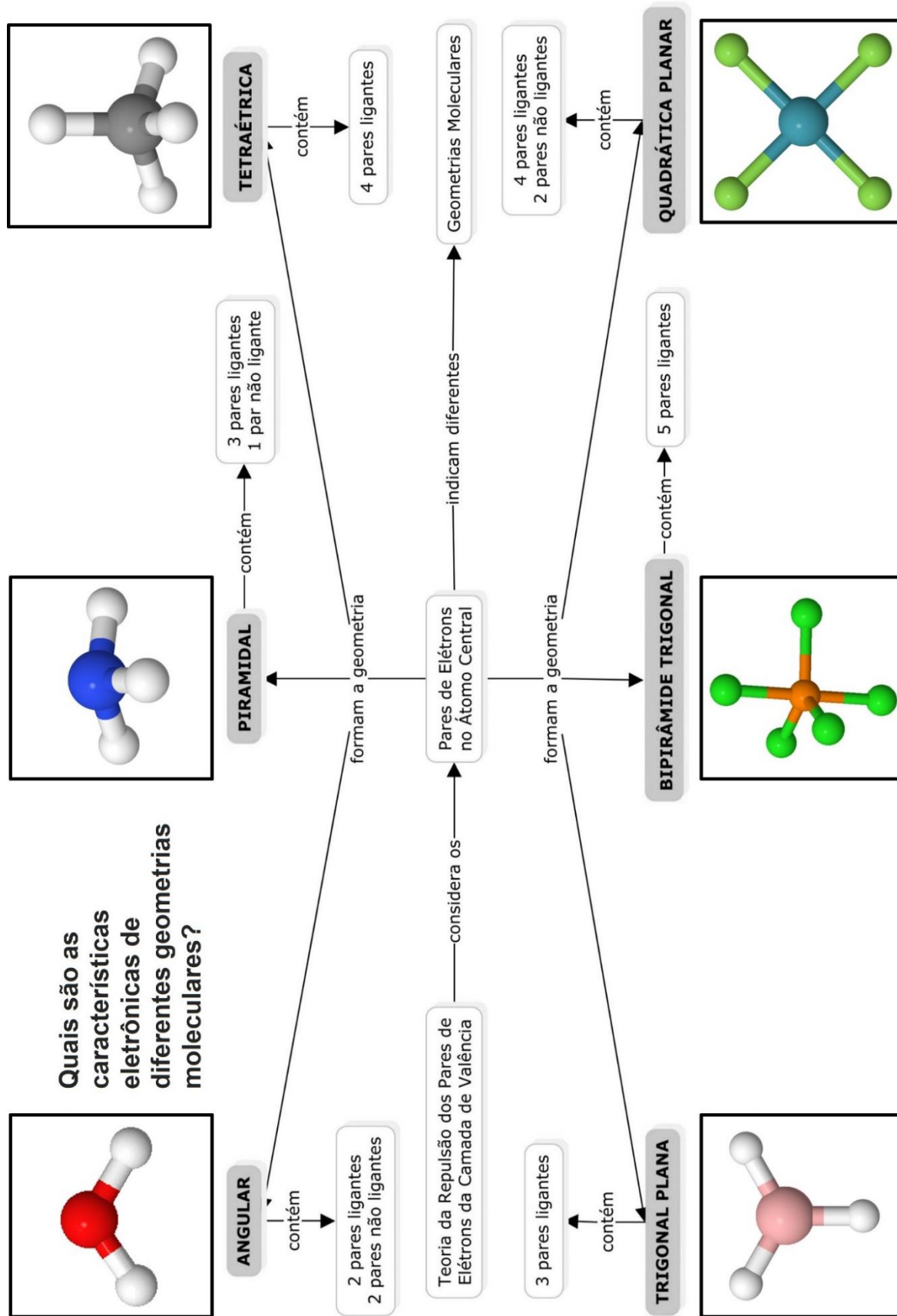
APÊNDICE D – Mapa conceitual com lacunas



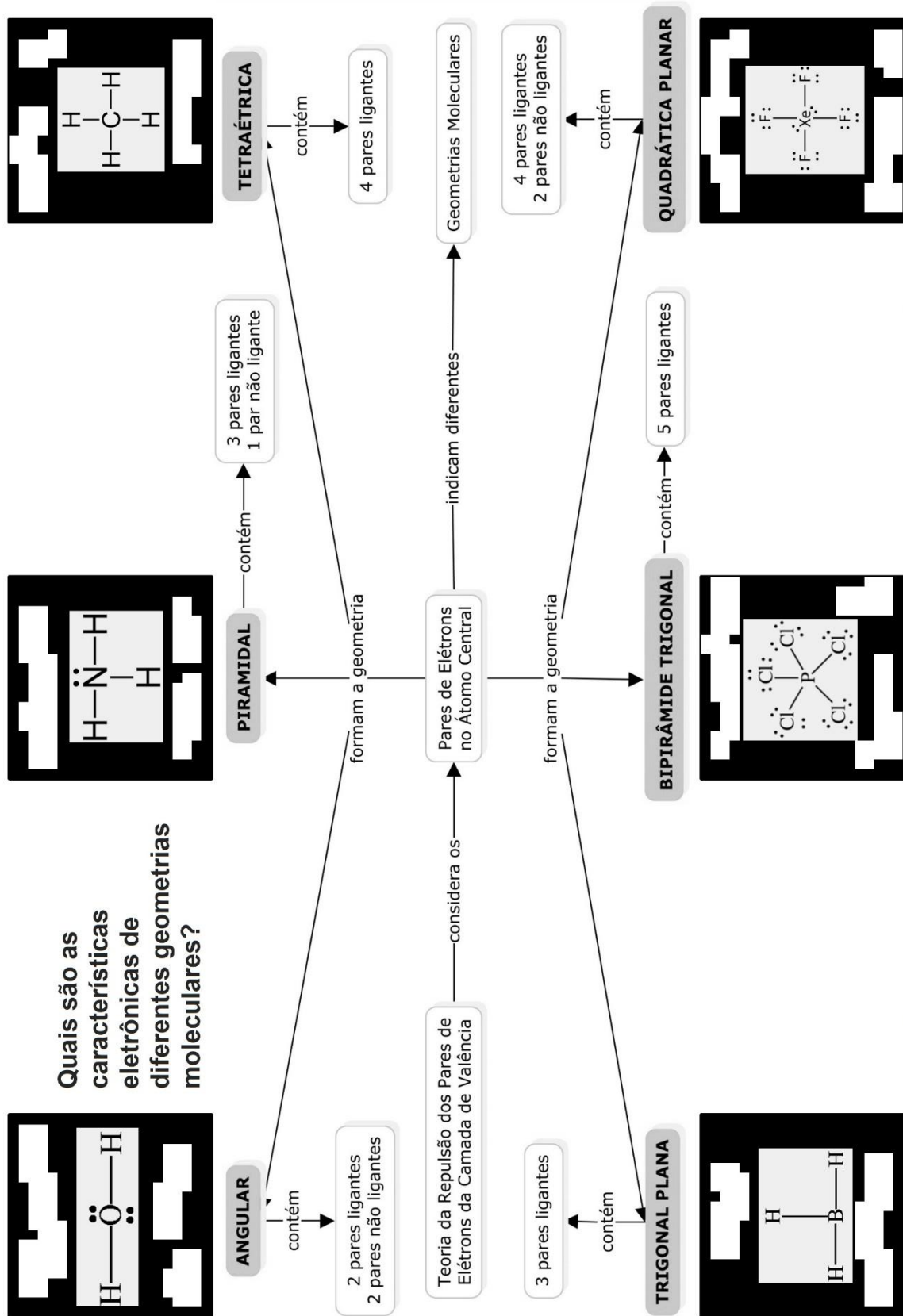
APÊNDICE E – Mapa conceitual com lacunas preenchidas



APÊNDICE F – Mapa conceitual com moléculas 3D estáticas



APÊNDICE G – Mapa conceitual com alvos para realidade aumentada



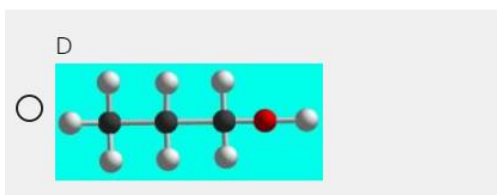
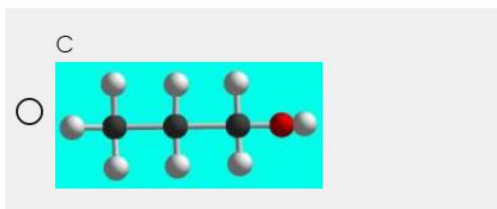
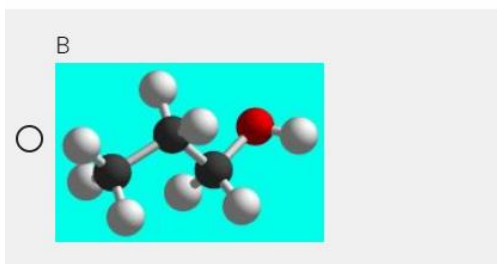
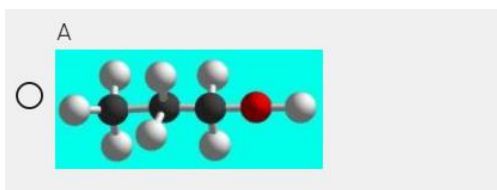
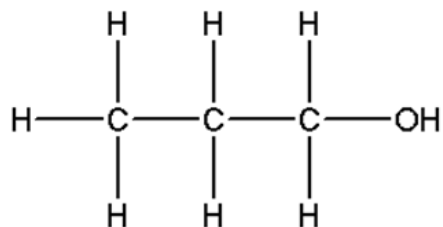
SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Mapa Conceitual de Geometria Molecular em Realidade Aumentada - MapRA. 2021. Patente: Programa de Computador. Registro: 512021002194-0, 15/09/2021, USP, INPI.

**APÊNDICE H – Pós-teste do estudo II**

<b>Instruções</b>			
Julgue cada afirmação a seguir como <u>Verdadeira (V)</u> ou <u>Falsa (F)</u> . Selecione <u>Não Sei (NS)</u> caso não saiba responder.			
<b>Afirmação</b>	<b>V</b>	<b>F</b>	<b>NS</b>
<b>1.</b> A repulsão eletrônica é devida à interação entre os pares de elétrons ligantes e não ligantes.			
<b>2.</b> Moléculas são as unidades básicas dos átomos.			
<b>3.</b> As nuvens eletrônicas ou densidades eletrônicas são espaços probabilísticos para se encontrar elétrons.			
<b>4.</b> A repulsão eletrônica ocorre somente entre pares de elétrons não ligantes.			
<b>5.</b> A eletronegatividade dos átomos de uma molécula não exerce influência sobre a atração dos pares de elétrons.			
<b>6.</b> A repulsão dos pares de elétrons da última camada é explicada pela teoria do octeto de Lewis.			
<b>7.</b> O ângulo de ligação entre átomos numa molécula não é influenciado pela eletronegatividade desses átomos.			
<b>8.</b> A existência de átomos com diferentes eletronegatividades numa molécula não a define como sendo polar ou apolar.			
<b>9.</b> Elétrons emparelhados numa ligação química adquirem menor estabilidade.			
<b>10.</b> Quando orbitais atômicos se sobrepõem pode ocorrer formação de moléculas.			
<b>11.</b> Por que o <b>BH<sub>3</sub></b> e <b>NH<sub>3</sub></b> possuem geometrias diferentes?			
<b>12.</b> Por que o <b>CH<sub>4</sub></b> e <b>XeF<sub>4</sub></b> possuem geometrias diferentes?			
<b>13.</b> Qual a importância do estudo da Geometria Molecular?			
<b>14.</b> Pegue 7 bolas de isopor e 8 palitos com o pesquisador. Construa as moléculas <b>PCl<sub>3</sub></b> e <b>BeH<sub>2</sub></b> . Tire foto de cada uma. Desmonte-as e com o mesmo material construa a molécula <b>SF<sub>6</sub></b> . Tire foto de cada molécula e envie as 3 fotos pelo MOODLE.			

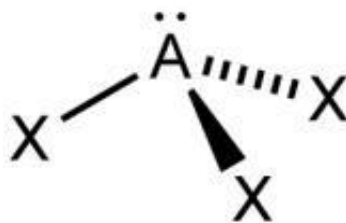
APÊNDICE I – Pré-teste e pós-teste do estudo III

1) What is the most appropriate way to represent the molecule below in 3 dimensions (3D)?



Provide a justification for your answer:

2) Consider the image below. What is the number of bonding electron pairs and nonbonding electron pairs, respectively?



2 bonding electron pairs, and 2 nonbonding electron pairs

3 bonding electron pairs, and 1 nonbonding electron pair

1 bonding electron pair, and 3 nonbonding electron pairs

0 bonding electron pair, and 1 nonbonding electron pair

Provide a justification for your answer:

3) The electronic geometry and molecular geometry of  $\text{H}_2\text{O}$  are, respectively:

bent and bent

bent and linear

tetrahedral and bent

tetrahedral and linear

Provide a justification for your answer:

4) The molecules  $\text{BH}_3$  and  $\text{NH}_3$  have, respectively, the geometries:

trigonal planar and trigonal pyramidal

trigonal planar and trigonal planar

trigonal pyramidal and trigonal planar

trigonal pyramidal and trigonal pyramidal

Provide a justification for your answer:

5) What is the possible chemical compound for the molecular representation below?



SH<sub>2</sub>

HCN

BeH<sub>2</sub>

HgCl<sub>2</sub>

Provide a justification for your answer:

# APENDICE J – Periodic table

## PERIODIC TABLE OF ELEMENTS

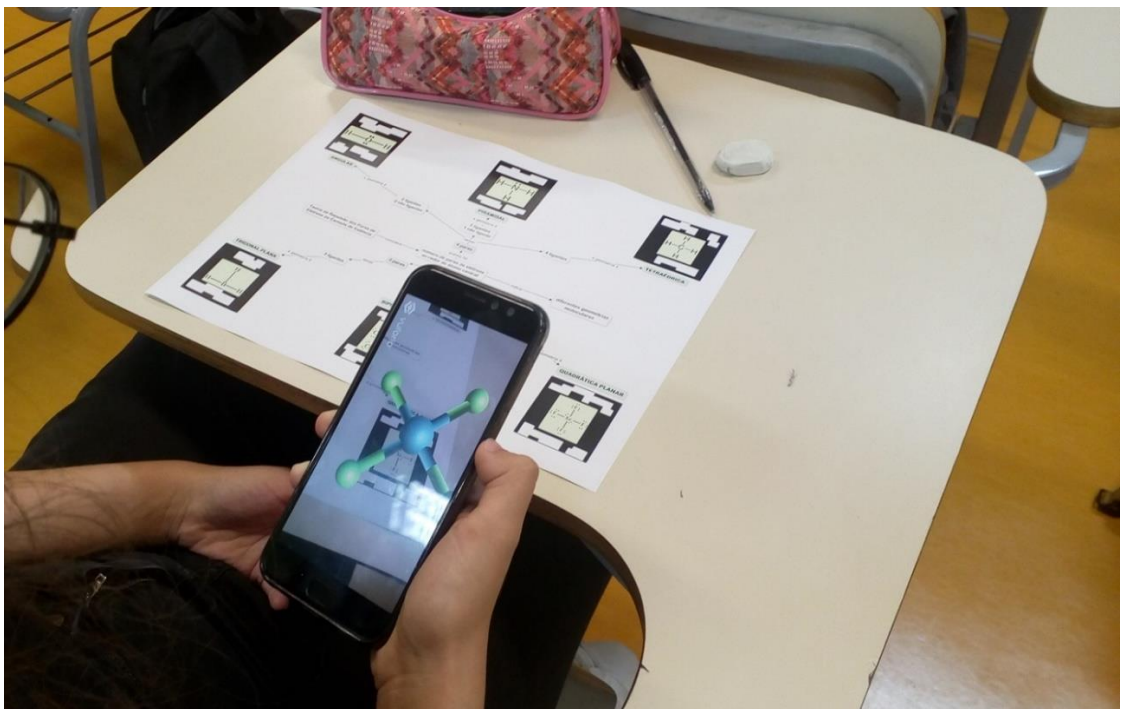
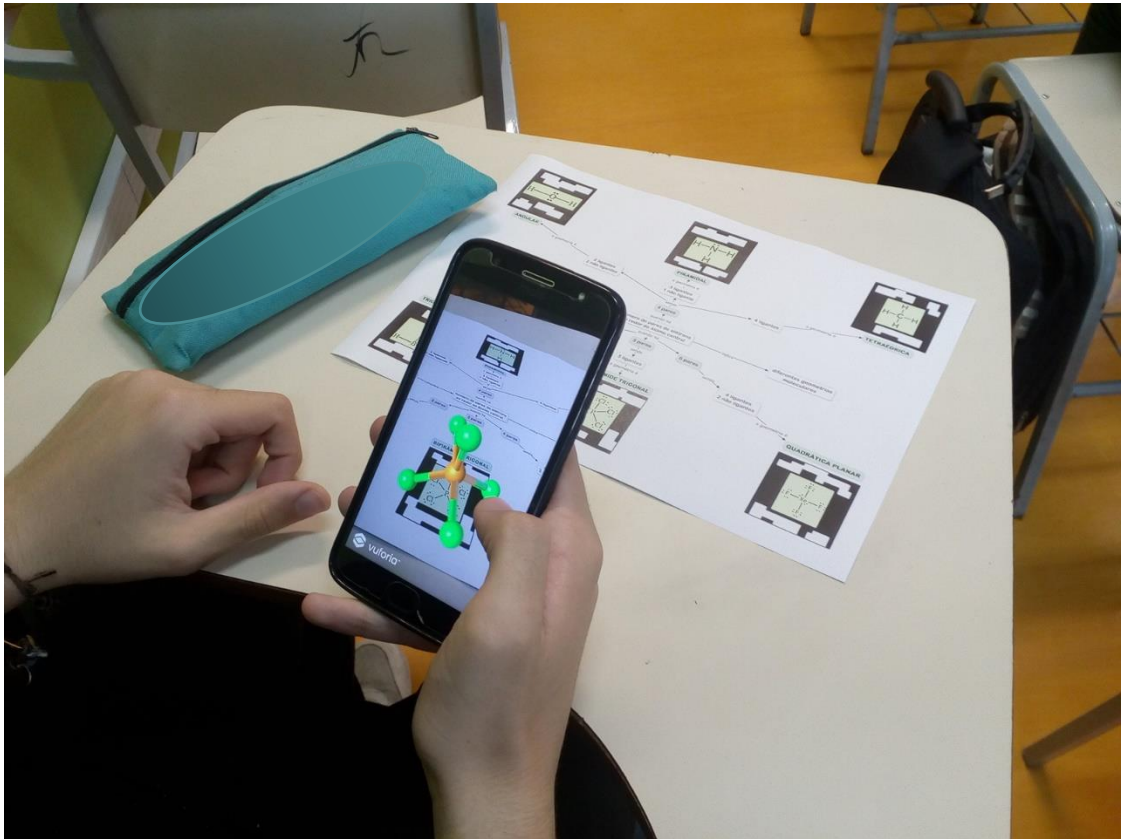
Chemical Group Block

		PubChem																																																																										
		Atomic Mass. u																																																																										
		Symbol																																																																										
		Chemical Group Block																																																																										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																																											
Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number	Atomic Number																																																										
Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name	Name																																																										
1 1.0080 <b>H</b> Hydrogen Nonmetal	2 4.00260 <b>He</b> Helium Noble Gas	3 7.0 <b>Li</b> Lithium Alkali Metal	4 9.012183 <b>Be</b> Beryllium Alkaline Earth Me...	5 11.22394 <b>Na</b> Sodium Alkali Metal	6 12.24305 <b>Mg</b> Magnesium Alkaline Earth Me...	7 17 35.45 <b>Cl</b> Chlorine Halogen	8 19 39.0983 <b>K</b> Potassium Alkali Metal	9 20 40.08 <b>Ca</b> Calcium Alkaline Earth Me...	10 21 44.95591 <b>Sc</b> Scandium Transition Metal	11 22 47.867 <b>Ti</b> Titanium Transition Metal	12 23 50.9415 <b>V</b> Vanadium Transition Metal	13 24 51.996 <b>Cr</b> Chromium Transition Metal	14 25 54.93804 <b>Mn</b> Manganese Transition Metal	15 26 55.84 <b>Fe</b> Iron Transition Metal	16 27 58.93319 <b>Co</b> Cobalt Transition Metal	17 28 58.93319 <b>Ni</b> Nickel Transition Metal	18 29 63.55 <b>Cu</b> Copper Transition Metal	19 30 65.4 <b>Zn</b> Zinc Transition Metal	20 31 69.723 <b>Ga</b> Gallium Post-Transition M...	21 32 72.63 <b>Ge</b> Germanium Metalloid	22 33 74.92159 <b>As</b> Arsenic Metalloid	23 34 78.97 <b>Se</b> Selenium Nonmetal	24 35 79.90 <b>Br</b> Bromine Halogen	25 36 83.80 <b>Kr</b> Krypton Noble Gas	26 37 85.468 <b>Rb</b> Rubidium Alkali Metal	27 38 87.62 <b>Sr</b> Strontium Alkaline Earth Me...	28 39 88.90584 <b>Y</b> Yttrium Transition Metal	29 40 91.22 <b>Zr</b> Zirconium Transition Metal	30 41 92.90637 <b>Nb</b> Niobium Transition Metal	31 42 95.95 <b>Mo</b> Molybdenum Transition Metal	32 43 96.90636 <b>Tc</b> Technetium Transition Metal	33 44 101.1 <b>Ru</b> Ruthenium Transition Metal	34 45 102.9055 <b>Rh</b> Rhodium Transition Metal	35 46 106.42 <b>Pd</b> Palladium Transition Metal	36 47 107.868 <b>Ag</b> Silver Transition Metal	37 48 112.41 <b>Cd</b> Cadmium Transition Metal	38 49 114.818 <b>In</b> Indium Post-Transition M...	39 50 118.71 <b>Sn</b> Tin Post-Transition M...	40 51 121.760 <b>Sb</b> Antimony Metalloid	41 52 127.6 <b>Te</b> Tellurium Metalloid	42 53 126.9045 <b>I</b> Iodine Halogen	43 54 131.29 <b>Xe</b> Xenon Noble Gas	44 55 132.90... <b>Cs</b> Cesium Alkali Metal	45 56 137.33 <b>Ba</b> Barium Alkaline Earth Me...	46 57 178.49 <b>Hf</b> Hafnium Transition Metal	47 58 178.49 <b>Ta</b> Tantalum Transition Metal	48 59 180.9479 <b>W</b> Tungsten Transition Metal	49 60 183.84 <b>Re</b> Rhenium Transition Metal	50 61 186.207 <b>Os</b> Osmium Transition Metal	51 62 190.2 <b>Ir</b> Iridium Transition Metal	52 63 195.08 <b>Pt</b> Platinum Transition Metal	53 64 197.01... <b>Au</b> Gold Transition Metal	54 65 197.01... <b>Hg</b> Mercury Transition Metal	55 66 197.01... <b>Tl</b> Thallium Post-Transition M...	56 67 197.01... <b>Pb</b> Lead Post-Transition M...	57 68 197.01... <b>Bi</b> Bismuth Post-Transition M...	58 69 197.01... <b>Po</b> Polonium Metalloid	59 70 197.01... <b>At</b> Astatine Halogen	60 71 197.01... <b>Rn</b> Radon Noble Gas	61 72 197.01... <b>Fr</b> Francium Alkali Metal	62 73 223.01... <b>Ra</b> Radium Alkaline Earth Me...	63 74 223.01... <b>Ac</b> Actinium Actinide	64 75 223.01... <b>Th</b> Thorium Actinide	65 76 223.01... <b>Pa</b> Protactinium Actinide	66 77 223.01... <b>U</b> Uranium Actinide	67 78 223.01... <b>Np</b> Neptunium Actinide	68 79 223.01... <b>Pu</b> Plutonium Actinide	69 80 223.01... <b>Am</b> Americium Actinide	70 81 223.01... <b>Cm</b> Curium Actinide	71 82 223.01... <b>Bk</b> Berkelium Actinide	72 83 223.01... <b>Cf</b> Californium Actinide	73 84 223.01... <b>Es</b> Einsteinium Actinide	74 85 223.01... <b>Fm</b> Fermium Actinide	75 86 223.01... <b>Md</b> Mendelevium Actinide	76 87 223.01... <b>No</b> Nobelium Actinide	77 88 223.01... <b>Lr</b> Lawrencium Actinide

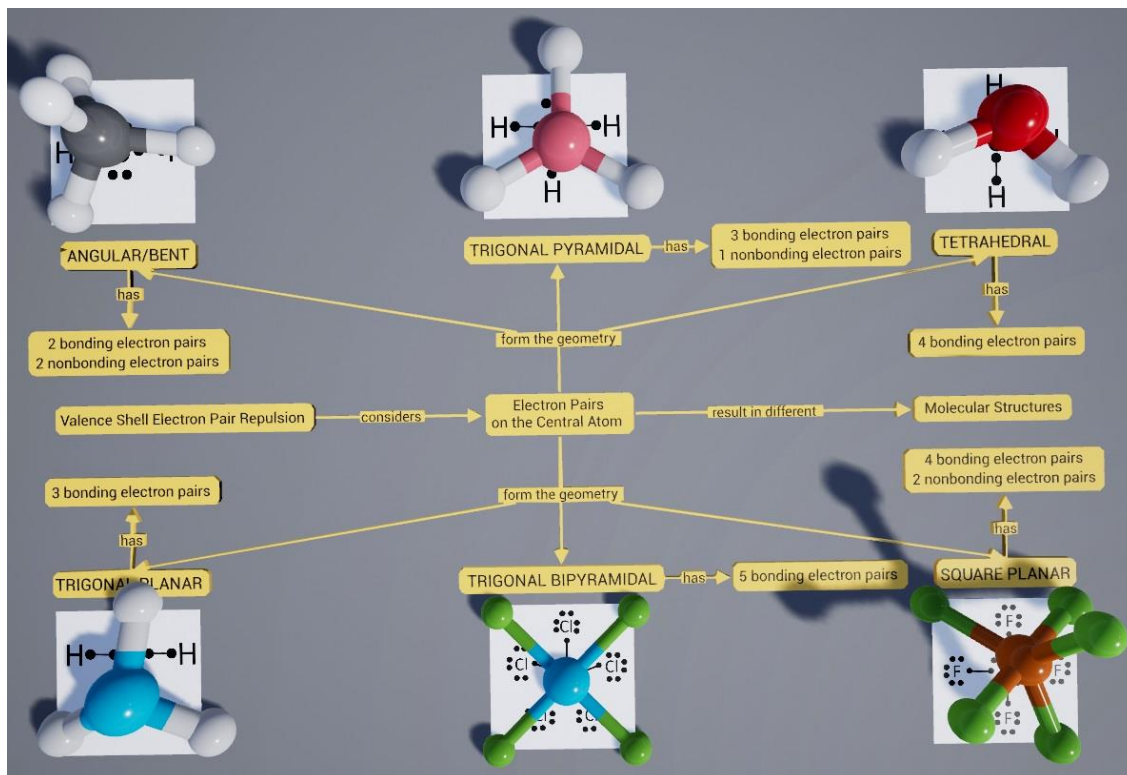
Fonte: National Center for Biotechnology Information (2024). Periodic Table of Elements. Retrieved April 11, 2024 from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>.

## ANEXOS

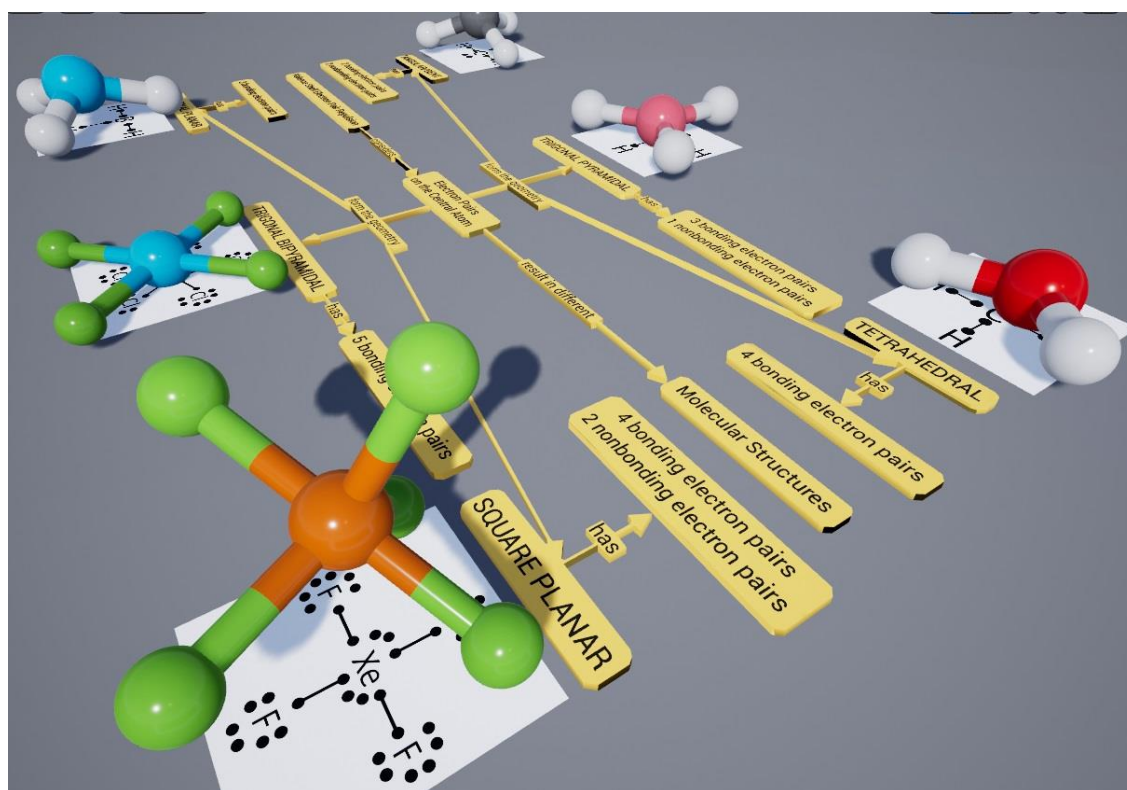
### ANEXO A – Fotos de estudantes utilizando aplicativo de realidade aumentada



## ANEXO B – Capturas de tela e experiência com realidade virtual



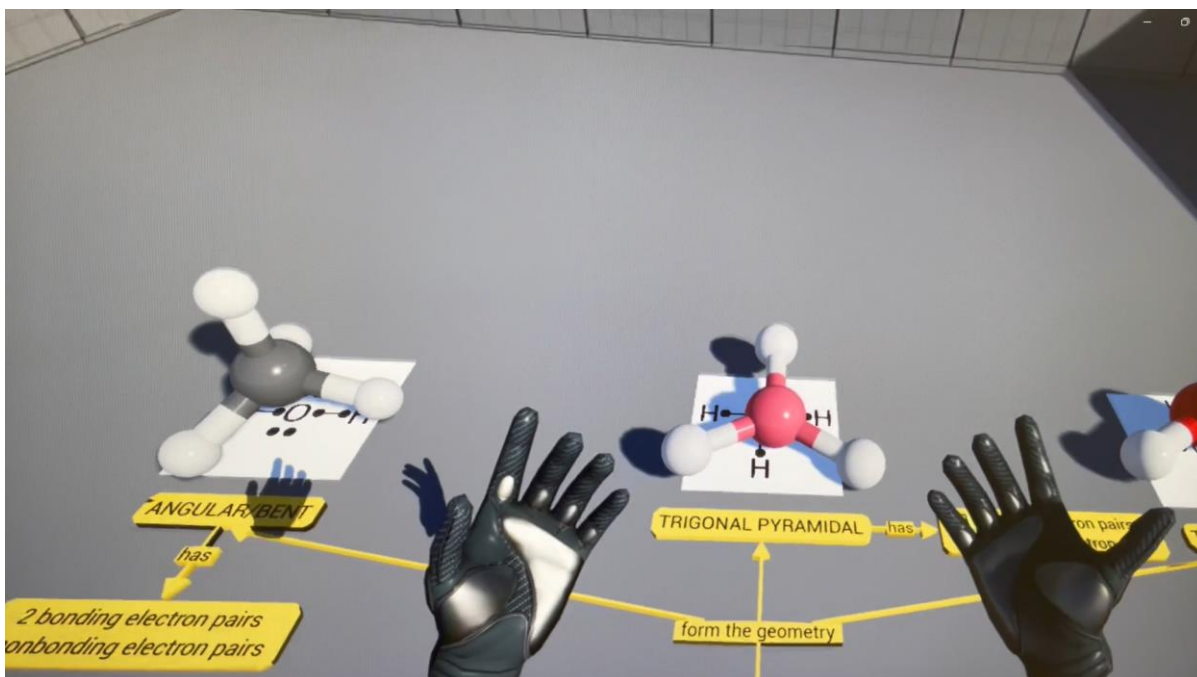
Visão geral do início das tarefas. As moléculas não estão no lugar correto.



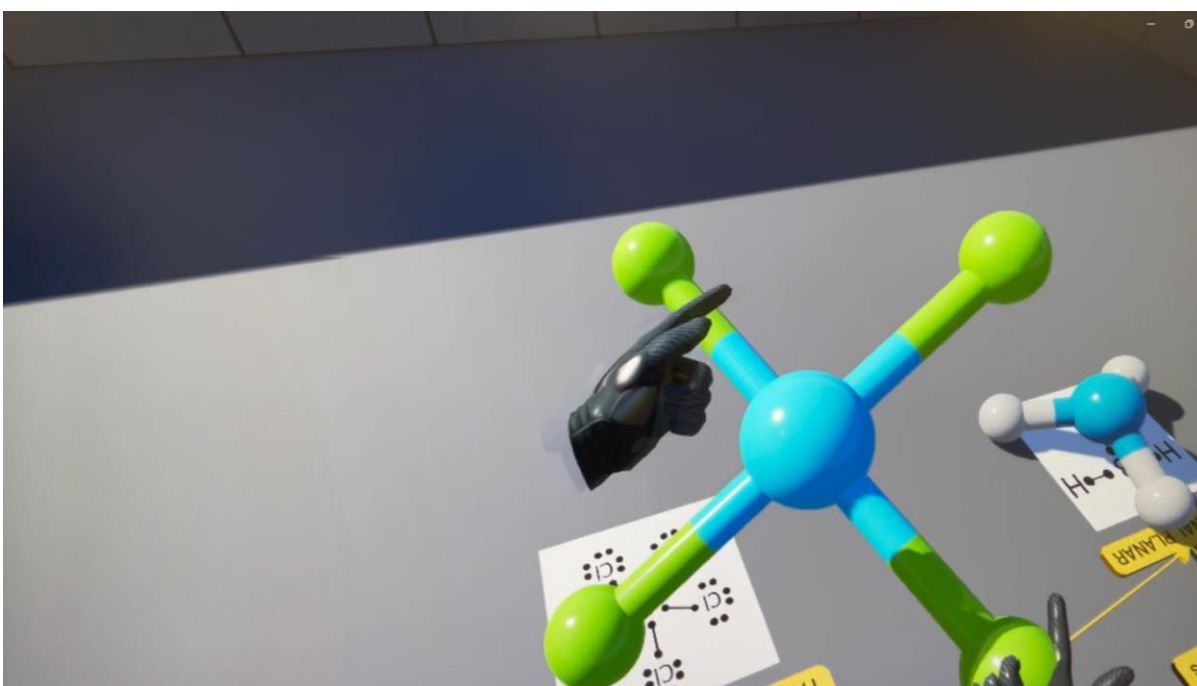
Outro ângulo da visão geral.



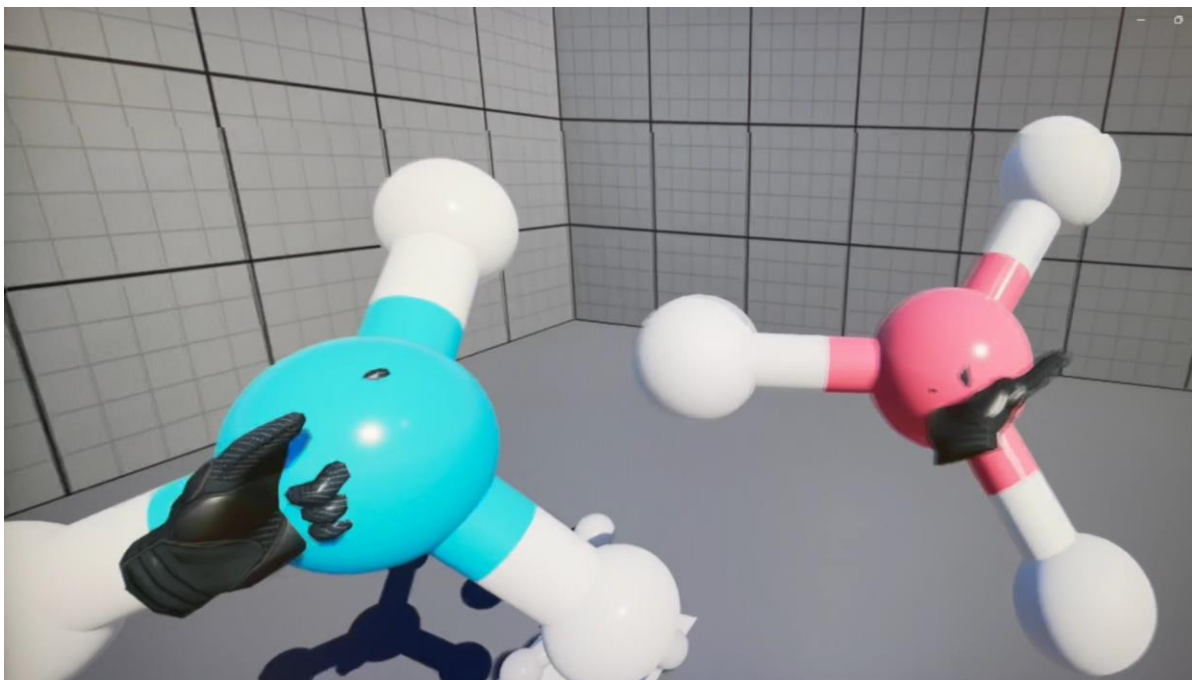
Realização de testes no laboratório de realidade estendida da Universidade de Surrey (Inglaterra).



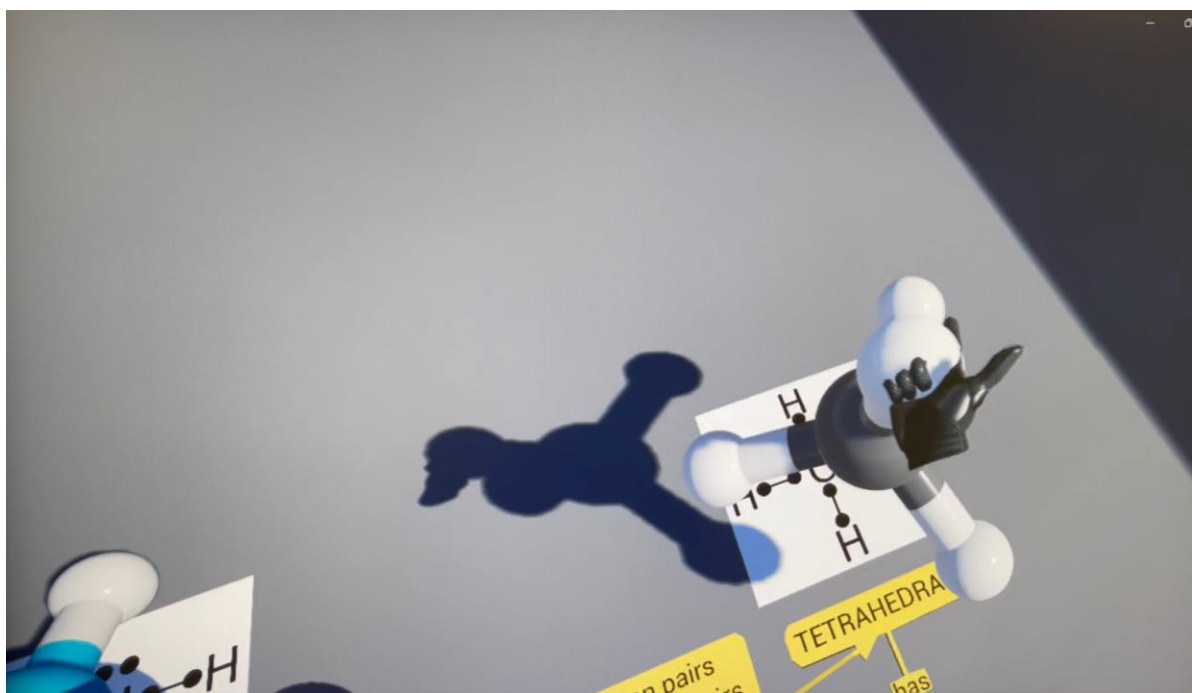
Sensação de *embodiment*: as mãos virtuais acompanham os movimentos reais do participante, proporcionando uma imersão mais profunda.



Estratégia de contagem dos átomos empregada pela maioria dos participantes.



Momento em que o participante compara duas moléculas, quando a estratégia de contagem dos átomos falha.



Momento em que o participante caminha sobre o mapa conceitual, se abaixa e coloca a molécula no lugar correto.

## ANEXO C – Produção acadêmica relacionada à pesquisa do doutorado

### Artigos científicos submetidos e/ou publicados

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Ensino e aprendizagem de geometria molecular: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Debates em Ensino de Química**. Manuscrito em avaliação.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. M. Perspectiva docente acerca da aprendizagem de geometria molecular: análise de entrevista mediada com mapa conceitual. **ENCITEC**, Santo Ângelo, v. 14, n. 1, p. 82-97, 2024. DOI: 0.31512/encitec.v14i1.1099.

SILVA, K. S.; FONSECA, L. S.; CORREIA, P. R. M. Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia (RBECT)**, Ponta Grossa, v. 13, n. 2, p. 247-268, 2020. DOI 10.3895/rbect.v13n2.9421

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC)**, v. 23, e42082, p. 1-21, 2023. DOI: 10.28976/1984-2686rbpec2023u579599.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Aprimorando a percepção espacial em geometria molecular através do estudo com mapas conceituais e tecnologia de realidade aumentada. **ALEXANDRIA: R. Educ. Ci. Tec.**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 335-353, 2023. DOI: 10.5007/1982-5153.2023.e 91971.

### Resumo publicado em anais de congresso

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. A aprendizagem mediada por Mapas Conceituais sob a perspectiva dos mecanismos atencionais. **In: XIV EPIEC - Encontro do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências | IFUSP, 2019, São Paulo. XIV EPIEC, 2019.**

### Apresentação de trabalho em congressos

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Efeito do estudo com mapa conceitual e realidade aumentada para a percepção de geometria molecular. 2022. (Apresentação de Trabalho). XIV Semana da Química, UFCAT.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. A aprendizagem mediada por Mapas Conceituais sob a perspectiva dos mecanismos atencionais. 2019. (Apresentação de Trabalho). XIV EPIEC - Encontro do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências.

### Patente

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Mapa Conceitual de Geometria Molecular em Realidade Aumentada - MapRA. 2021. **Patente**: Programa de Computador. Número do registro: 512021002194-0, data de registro: 15/09/2021, título: "Mapa Conceitual de Geometria Molecular em Realidade Aumentada - MapRA" Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

### **Apresentação de seminários e palestras**

SILVA, K. S. A neurociência do engajamento, construção e consolidação da aprendizagem de química - Palestra UNESPAR. 2021. (Apresentação de palestra).

SILVA, K. S. Sistema atencional, aprendizagem e mapas conceituais. 2020. Apresentação de Seminário no GPMC.

SILVA, K. S. Neurociência, tecnologias digitais e aprendizagem significativa - Palestra SNCT/MCTI. 2020. (Apresentação de palestra).

SILVA, K. S. A neurociência e psicologia cognitiva enquanto suporte de uma ciência para a educação. 2019. Apresentação de Seminário no GPMC.

### **Entrevistas e comentários na mídia**

SILVA, K. S. Aplicativo de realidade aumentada para ensino e aprendizagem de geometria molecular. 2023. Projeto Showroom de Tecnologias USP by Santander no SciBiz 2023. Disponível em:  
<https://www.youtube.com/watch?v=CfXoHopGI3I&list=PL3M6MBsgyM374Cm75FY8RhzWoEhudchhK&index=14>. Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S. Imagem em mapa conceitual, pode? 2022. (Programa de rádio ou TV/Entrevista). Podcast Conceituados GPMC. Disponível em:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ylzyvriyn2c>. Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Ensino de geometria molecular fica mais fácil com aplicativo desenvolvido na USP (Jornal da USP). 2022. (Comentário). Disponível em:  
<https://jornal.usp.br/universidade/ensino-de-geometria-molecular-fica-mais-facil-com-aplicativo-desenvolvido-na-usp/>. Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Docente desenvolve aplicativo de realidade aumentada para ensinar Química (IFAL). 2022. (Comentário). Disponível em:  
<https://www2.ifal.edu.br/campus/penedo/noticias/docente-do-campus-penedo-desenvolve-aplicativo-de-realidade-aumentada-para-ensinar-quimica>. Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Pesquisadores da USP desenvolvem aplicativo mobile de realidade aumentada para ensinar geometria molecular (EACH-USP). 2022. (Comentário). Disponível em: <http://www5.each.usp.br/destaques-principais/pesquisadores-da-usp-desenvolvem-aplicativo-mobile-de-realidade-aumentada-para-ensinar-geometria-molecular/>. Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Aplicativo desenvolvido na USP facilita aprendizado de geometria molecular (CRQ-IV). 2022. (Comentário). Disponível em: [https://www.crq4.org.br/geo\\_molecular](https://www.crq4.org.br/geo_molecular). Acesso em 13 abr. 2024.

SILVA, K. S. Mapas Conceituais e Neurociência Cognitiva. 2020. (Programa de rádio ou TV/Entrevista). Canal do GPMC. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=DIBT4au8\\_CU&list=PL\\_0bnzX9RwCfF6e0pb8BLfNiaEhoQLb9\\_&index=8](https://www.youtube.com/watch?v=DIBT4au8_CU&list=PL_0bnzX9RwCfF6e0pb8BLfNiaEhoQLb9_&index=8). Acesso em 13 abr. 2024.

### **Menção honrosa e destaques**

Menção honrosa de melhor apresentação (1º Lugar) da área de Ensino de Química na XIV Semana da Química, UFCAT. 2022.

Destaque XIV Ciclo de Seminários: neurociência e psicologia cognitiva na educação, GPMC/USP. 2019.

Destaque XIII Ciclo de Seminários: atenção seletiva e mapas conceituais, GPMC/USP. 2018.

### **Qualificação acadêmica**

Realização de Doutorado Sanduíche (CAPES) na Universidade de Surrey (Inglaterra). Atuação no Laboratório de Realidade Estendida da Escola de Psicologia. Supervisora: Emily Farran. 2023. Projeto: Concept Map and Virtual Reality as Educational Tools to Enhance 3D Visualisation in Science.



Estágio PAE (USP/EACH) na Disciplina Química Geral do Curso de Biotecnologia. 2019.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Ensino e aprendizagem de geometria molecular: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Debates em Ensino de Química**. Manuscrito em avaliação.





## ENSINO E APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

MOLECULAR GEOMETRY TEACHING AND LEARNING: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Kleyfton Soares da Silva  

Instituto Federal de Alagoas (IFAL)  
<http://orcid.org/0000-0002-8526-961X>  
<http://lattes.cnpq.br/9040267542465304>  
[✉ kley\\_soares@hotmail.com](mailto:kley_soares@hotmail.com)

Paulo Rogério Miranda Correia  

Afiliação (Apenas Instituição e sigla)  
<http://orcid.org/0000-0003-2419-7103>  
<http://lattes.cnpq.br/1028921713215334>  
[✉ prmc@usp.br](mailto:prmc@usp.br)

**RESUMO:** O objetivo desta pesquisa foi identificar e analisar estudos teóricos e empíricos acerca da aprendizagem de geometria molecular, identificando evidências científicas e possíveis lacunas para direcionar futuras pesquisas. Conduziu-se uma pesquisa bibliográfica, a partir de uma revisão sistemática da literatura, analisando-se 46 estudos teóricos e empíricos extraídos de diretórios de busca nacionais e internacionais. Quatro linhas de investigação principais foram identificadas – habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, diagnóstico de erros conceituais, estratégias didáticas – para caracterizar as discussões atuais em torno do tema. As lacunas existentes se relacionam com limitações na abordagem quanto à: (1) relação da questão da visualização em química com o desenvolvimento de habilidades espaciais; (2) identificação de erros conceituais relacionados não só a conceitos de geometria molecular, mas à questão da espacialidade; (3) perspectiva de professores de química acerca do ensino e aprendizagem de geometria molecular. As lacunas apontadas oferecem perspectivas aos leitores para que novas pesquisas sejam conduzidas visando uma melhor compreensão de diferentes aspectos da aprendizagem de geometria molecular.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erros conceituais. Estratégias didáticas. Habilidades espaciais. Geometria molecular.

**ABSTRACT:** The aim of this research was to identify and analyse theoretical and empirical studies about molecular geometry learning, identifying scientific evidence and possible gaps to direct future research. Bibliographic research was conducted, based on a systematic literature review, through the analysis of 46 theoretical and empirical studies extracted from national and international search directories. Four main investigation lines were identified – spatial skills, structure-property relationship, diagnosis of conceptual errors, didactic strategies – to characterize the current discussions around the topic. The existing gaps are related to limitations in the approach regarding: (1) the relationship between visualization in chemistry and the development of spatial skills; (2) identification of conceptual errors related not only to molecular geometry concepts, but also to the issue of spatiality; (3) perspective of chemistry teachers on the teaching and learning of molecular geometry. The identified gaps offer perspectives to readers for further research to be conducted aiming at a better understanding of different aspects of molecular geometry learning.

**KEY WORDS:** Misconceptions. Didactic strategies. Spatial skills. Structure-property relationship.

### Introdução

O estudo da geometria molecular é importante para a compreensão submicroscópica das propriedades físicas e químicas dos compostos (Baldock *et al.*, 2021). Porém, as dificuldades de



## PERSPECTIVA DOCENTE ACERCA DA APRENDIZAGEM DE GEOMETRIA MOLECULAR: ANÁLISE DE ENTREVISTA MEDIADA COM MAPA CONCEITUAL

### TEACHING PERSPECTIVE ABOUT THE MOLECULAR GEOMETRY LEARNING: INTERVIEW ANALYSIS THROUGH A CONCEPT MAP

Kleyfton Soares da Silva<sup>1</sup>, Paulo Rogério Miranda Correia<sup>2</sup>

Recebido: novembro/2022 Aprovado: dezembro/2023

**Resumo:** A preocupação com questões específicas sobre o ensino de química tem norteado pesquisas empíricas de modo que os dados coletados derivam das experiências de aprendizagem dos próprios estudantes. No entanto, uma lacuna de pesquisa tem sido identificada pela falta de investigação da percepção dos professores acerca da aprendizagem de geometria molecular, tendo em vista que eles são fonte de informações relevantes oriundas, principalmente, das experiências de sala de aula. O objetivo desta pesquisa foi fazer um levantamento de concepções docentes atreladas à aprendizagem – pelos estudantes – dos principais conceitos de geometria molecular. Enquanto estratégia de investigação, utilizou-se uma entrevista estruturada de pesquisa mediada por mapa conceitual para explicitar conceitos e, a partir da discussão deles, identificar as concepções dos docentes. As contribuições dos docentes permearam quatro linhas de discussão acerca da aprendizagem de geometria molecular: habilidades espaciais, relação estrutura-propriedade, estratégias didáticas e erros conceituais. Os resultados deste estudo reafirmam a importância de considerar não apenas as expectativas e desafios dos estudantes, mas também os insights dos docentes, que, por meio de suas experiências, podem contribuir para a criação de ambientes de aprendizagem mais eficazes.

**Palavras-chave:** Ensino de Química, Moléculas, Representação, Visualização.

**Abstract:** The concern with specific questions about the chemistry teaching has guided empirical research so that the data collected derive from the learning experiences of the students themselves. However, a research gap has been identified by the lack of investigation of the teachers' perception about molecular geometry learning, considering that they are a source of relevant information arising, mainly, from classroom experiences. The aim of this research was to carry out a survey of teaching conceptions linked to learning – by students – of the main molecular geometry concepts. As an investigation strategy, a structured research interview mediated by a conceptual map was used to explain concepts and – based on their discussion – identify the teachers' conceptions. The professors' contributions permeated four lines of discussion about molecular geometry learning: spatial skills, structure-property relationship, didactic strategies, and conceptual errors. The results of this study revive the need to consider not only the expectations and difficulties of the students, but also the teachers who – based on their experiences – can reveal more suitable scenarios for student learning.

**Keywords:** Chemistry Teaching, Molecules, Representation, Visualization.

## 1. Introdução

O ensino de geometria molecular tem chamado a atenção de educadores que se propõem a investigar fenômenos de aprendizagem no âmbito do ensino de química (Ribeiro; Sutério;

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8526-961X> - Doutorando em Ensino de Ciências (USP). Professor de Química do Instituto Federal de Alagoas (IFAL), Coruripe, AL, Brasil. E-mail: kley.soares@hotmail.com

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2419-7103> - Doutor em Química (USP). Professor de Química da Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH/USP), São Paulo, SP, Brasil. E-mail: prmc@usp.br



SILVA, K. S.; FONSECA, L. S.; CORREIA, P. R. M. Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia (RBECT)**, Ponta Grossa, v. 13, n. 2, p. 247-268, 2020. DOI 10.3895/rbect.v13n2.9421



Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia

ISSN: 1982-873X

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect>

## Abordagem neurocognitiva de processos atencionais envolvidos na aprendizagem mediada por mapas conceituais

### RESUMO

Kleyfton Soares da Silva  
[kley.soares@hotmail.com](mailto:kley.soares@hotmail.com)  
0000-0002-8526-961X  
Instituto Federal Goiano, Campos Belos,  
Goiás, Brasil.

Laerte Silva da Fonseca  
[laerte.fonseca@uol.com.br](mailto:laerte.fonseca@uol.com.br)  
0000-0002-0215-0606  
Instituto Federal de Sergipe, Aracaju,  
Sergipe, Brasil.

Paulo Rogério Miranda Correia  
[prmc@usp.br](mailto:prmc@usp.br)  
0000-0003-2419-7103  
Universidade de São Paulo, São Paulo,  
São Paulo, Brasil.

O engajamento atencional do aluno durante a aprendizagem parece ser o principal objetivo a ser alcançado quando se está elaborando um material instrucional. O mapeamento conceitual tem sido difundido com uma técnica promissora para a aquisição e representação de ideias, revelando-se como uma alternativa pedagógica útil no cotidiano escolar. O objetivo deste trabalho é apresentar subsídios teóricos nos campos da neurociência cognitiva, psicologia cognitiva e educação para justificar, a partir do funcionamento cerebral da atenção, estratégias pedagógicas que explorem o uso de mapas conceituais. Um quadro de referência foi produzido com indicações de mapas conceituais que levam em consideração o fator “atenção” no processo de aprendizagem, como o mapa com erros, com lacunas, com figuras e com cores/contrastes. Baseada nas noções de mecanismos atencionais e processamento da informação da Teoria da Carga Cognitiva, uma proposta de construção de mapas conceituais foi apresentada para exemplificar a aplicação da literatura discutida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Atenção. Mapas conceituais. Neurociência cognitiva e educação.

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (RBPEC)**, v. 23, e42082, p. 1-21, 2023. DOI: 10.28976/1984-2686rbpec2023u579599.



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Submetido em 11/12/2022 • Aceito em 21/03/2023

<https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2023u579599>

## Estratégia Para Identificar Erros Conceituais de Química: Incompreensões em Torno da Aprendizagem de Geometria Molecular

Kleyfton Soares da Silva <sup>ORCID</sup> • Paulo Rogério Miranda Correia <sup>ORCID</sup>

### Resumo

Estudos acerca de erros conceituais de geometria molecular foram majoritariamente realizados no âmbito internacional e revelaram concepções errôneas importantes para a compreensão das dificuldades de aprendizagem. No entanto, não há pesquisas explorando erros conceituais associados à percepção espacial das moléculas no estudo da geometria molecular. O objetivo desta pesquisa foi identificar e avaliar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio da elaboração e aplicação de um teste diagnóstico de dois níveis. Utilizou-se uma metodologia mista para a categorização e análise dos dados coletados de 55 estudantes ingressantes no nível superior (graduação em biotecnologia) de uma universidade pública. O estudo revelou erros importantes acerca das noções de geometria molecular e nos convidam a refletir sobre estratégias didáticas para os diferentes níveis de ensino (médio e superior). Verificou-se que estudantes possuem dificuldades para entender diferentes aspectos de múltiplas representações, afetando negativamente a compreensão da transição entre uma representação bidimensional e tridimensional. As duas primeiras questões do teste diagnóstico de dois níveis permitiram identificar cinco erros conceituais associados com a percepção tridimensional das moléculas, evidenciando que estudantes possuem concepções equivocadas acerca da relação entre a disposição espacial e os princípios que a fundamenta.

*Palavras-chave:* moléculas em 3D, múltiplas representações, percepção espacial, visualização

### Strategy for Identifying Conceptual Errors in Chemistry: Misunderstandings Around the Molecular Geometry Learning

#### Abstract

Studies on conceptual errors in molecular geometry have mainly been conducted internationally and have revealed important misconceptions that affect learning difficulties. However, there is a lack of research exploring conceptual errors associated with spatial perception of molecules in the study of molecular geometry. The aim of this research was to identify and evaluate conceptual errors associated with the learning of molecular geometry through the development and application of a two-level diagnostic test. A mixed methodology was used to categorize and analyze the data collected from 55 biotechnology undergraduate students at a public university. The study revealed significant errors concerning the concepts of molecular geometry and invites us to reflect on teaching strategies for different levels of education (high school and higher education). It was found that students have difficulties in understanding different aspects of multiple representations, negatively impacting their understanding of the transition between a two-dimensional and three-dimensional representation. The first two questions of the two-level diagnostic test allowed the identification of five conceptual errors associated with the three-dimensional perception of molecules, demonstrating that students hold misconceptions regarding the relationship between spatial arrangement and its underlying principles.

*Keywords:* 3D molecules, multiple representations, spatial perception, visualization

SILVA, K. S.; CORREIA, P. R. M. Aprimorando a percepção espacial em geometria molecular através do estudo com mapas conceituais e tecnologia de realidade aumentada. **ALEXANDRIA: R. Educ. Ci. Tec.**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 335-353, 2023. DOI: 10.5007/1982-5153.2023.e 91971.

ALEXANDRIA: R. Educ. Ci. Tec., Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 335-353, novembro 2023.  
<https://doi.org/10.5007/1982-5153.2023.e 91971>



**ALEXANDRIA**

Revista de Educação em Ciência e Tecnologia

## **Aprimorando a Percepção Espacial em Geometria Molecular através do Estudo com Mapas Conceituais e Tecnologia de Realidade Aumentada**

*Enhancing Spatial Perception in Molecular Geometry through Concept Mapping and Augmented Reality Technology*

**Kleyfton Soares da Silva<sup>a</sup>; Paulo Rogerio Miranda Correia<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Penedo, Brasil - [kley.soares@hotmail.com](mailto:kley.soares@hotmail.com)

<sup>b</sup> Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil - [prmc@usp.br](mailto:prmc@usp.br)

**Palavras-chave:**  
Estrutura molecular.  
Mapa conceitual.  
Realidade aumentada.  
Representação visual.

**Resumo:** O objetivo foi avaliar o efeito da aplicação de mapa conceitual com realidade aumentada na aprendizagem de geometria molecular. Estudantes (N=55) do Ensino Superior responderam a um pré-teste sobre geometria. Separou-se os estudantes em dois grupos para revisarem o assunto com o apoio de um mapa conceitual com moléculas estáticas (grupo A) e de um mapa conceitual com realidade aumentada (grupo B) – recurso digital desenvolvido especialmente para esta pesquisa. Solicitou-se que todos os estudantes construíssem três moléculas físicas com bolas de isopor e palitos. Atribuiu-se uma nota de 0 a 10 para o pré-teste e tarefa de construção de moléculas físicas. O resultado do pré-teste mostrou que não houve diferença significativa entre os grupos. Na tarefa de construção de moléculas físicas houve diferença significativa entre os grupos. Os resultados sugerem que o desempenho superior do grupo B pode ter sido influenciado por fatores emocionais e de atenção, além da interação com as moléculas em movimento na realidade aumentada, embora essas suposições não tenham sido diretamente comprovadas pela pesquisa principal.

**Keywords:**  
Molecular structure.  
Concept map.  
Augmented reality.  
Visual representation.

**Abstract:** The aim was to evaluate the effect of applying a concept map with augmented reality on molecular geometry learning. Higher Education students (N=55) answered a pre-test on molecular geometry. The students were separated into two groups to review the subject with the support of a conceptual map with static molecules (group A) and a conceptual map with augmented reality (group B) – a digital resource developed especially for this research. All students were asked to build three molecules with styrofoam balls and wood sticks. A score from 0 to 10 was assigned to the pre-test and task of building physical molecules. The result of the pre-test showed that there was no significant difference between the groups. In the task of building physical molecules there was a significant difference between the groups. The results suggest that the higher performance of Group B may have been influenced by emotional and attention-related factors, in addition to the interaction with the dynamic molecules in augmented reality, although these assumptions have not been directly substantiated by the main research.



Esta obra foi licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)