



# 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 Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas (IFAL)

✉ [kley.soares@hotmail.com](mailto:kley.soares@hotmail.com)

Paulo Rogerio Miranda Correia  

Universidade de São Paulo (USP)

✉ [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 several 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 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, 2023b). Para além de erros conceituais associados à estrutura molecular, Silva e Correia (2023b) 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, 2023b). 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 (RSL).

A necessidade de uma revisão dessa natureza surge em resposta à preocupação com a operacionalização da atual Base Nacional Comum Curricular (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.

## 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 seguintes perguntas: Quais são as dificuldades dos estudantes quanto à aprendizagem de geometria molecular? Quais são as características dos métodos de ensino empregados?

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.

## 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) da *Web of Science* (2022)

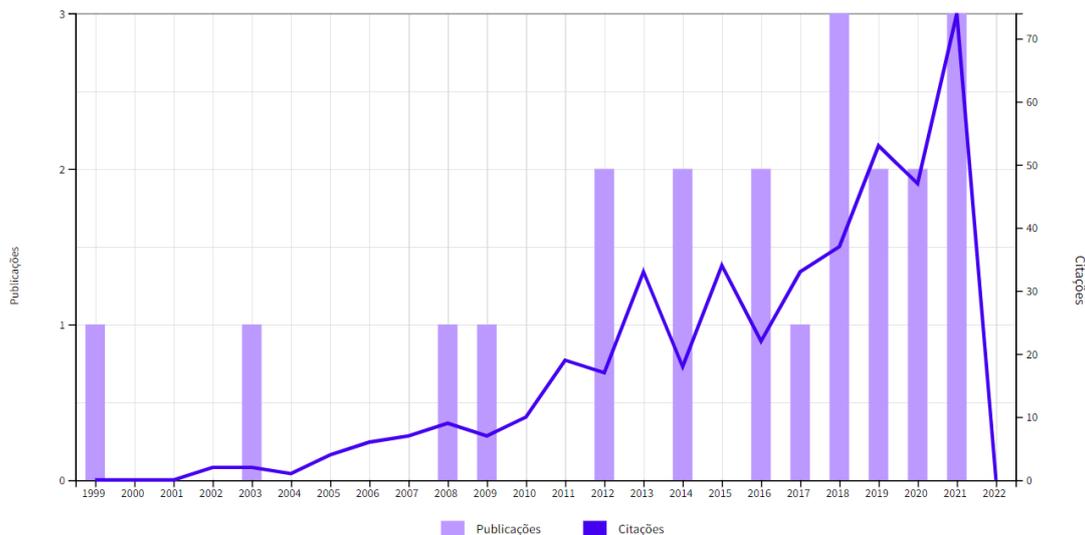
Título do artigo	Autor (ano)
Student discovery of the relationship between molecular structure, solubility, and intermolecular forces	Baldock <i>et al.</i> (2021)
Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: the Lewis structure 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.

## Apresentação da Literatura Nacional (Catálogo de Dissertações e Teses e 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 1 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 1 tese consultadas no catálogo de dissertações e teses

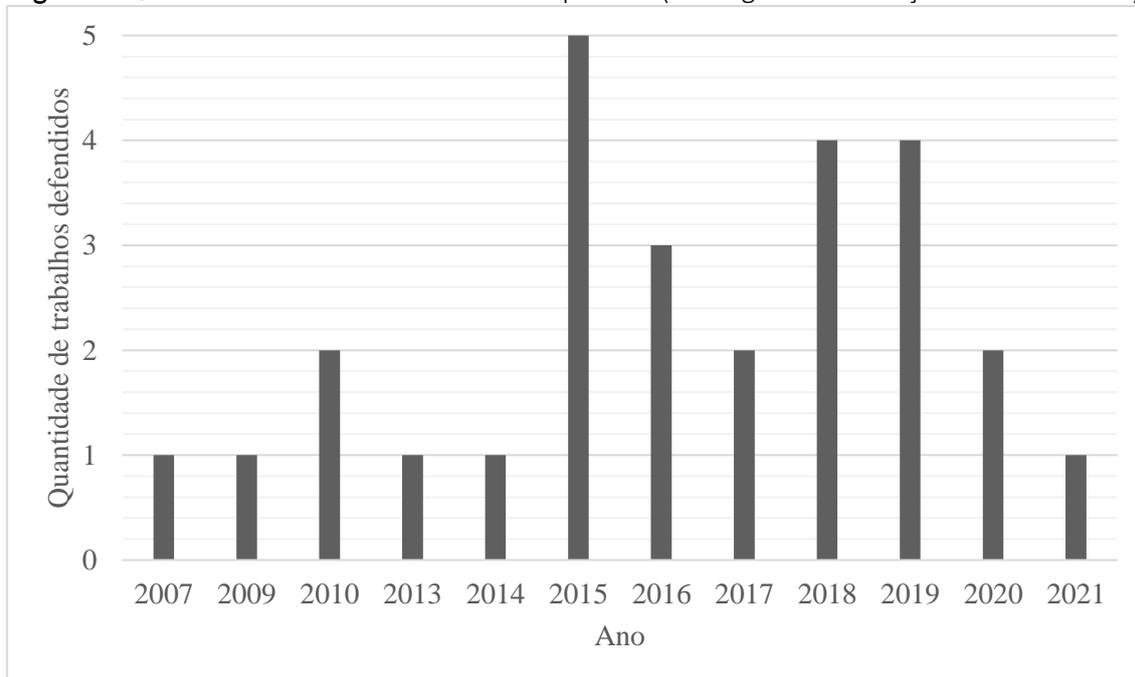
Título do artigo	Autor (ano)
Tecnologias no ensino de geometria molecular	Neto (2007)
Modelos confeccionados em impressora 3d para o ensino de geometria molecular em química	Andrade (2019)
Ensino de geometria molecular com aplicativo de simulação digital: possíveis contribuições para uma aprendizagem 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 arquetônico 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)
Sismo3d: 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, 6 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.

### 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> (2021); 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	34

	(2015); Silva (2018); Bertalli (2010); Silva (2014); Bacega (2020); Fabri (2016).	
--	---	--

**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 as dificuldades dos estudantes quanto à aprendizagem de geometria molecular. Já em estratégias didáticas, buscou-se caracterizar os métodos de ensino e aprendizagem empregados.

### 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.* (2021) 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.

### 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).

### 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 $\text{NH}_3$ e $\text{NF}_3$ , se as geometrias das moléculas têm uma forma piramidal trigonal, os ângulos de ligação não podem ser diferentes.	Uyulgan <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).

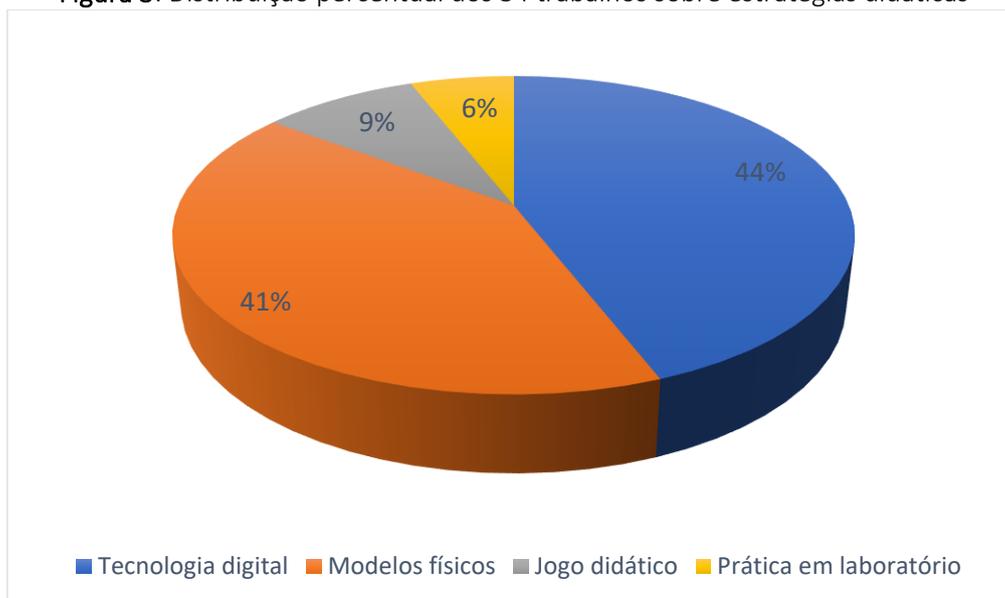
**Fonte:** Os autores.

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.

### 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 Gérard 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.

## 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, 2023a).

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, 2023b).

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 *et al.* (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, 2023a). 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.

### Agradecimentos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas.

### Referências

- Abdinejad, M., Talaie, B., Qorbani, H. S., & Dalili, S. (2021). Student Perceptions using augmented reality and 3D visualization technologies in chemistry education. *J Sci Educ Technol*, 30, 87–96.
- Abualia, M., Schroeder, L., Garcia, M., Daubenmire, P. L., Wink, D. J., & Clark, G. A. (2016). Connecting protein structure to intermolecular interactions: a computer modeling laboratory. *J. Chem. Educ.*, 93, 1353–1363.
- Akkuzu, N., & Uyulgan, M. A. (2016). An epistemological inquiry into organic chemistry education: exploration of undergraduate students' conceptual understanding of functional groups. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 17, 36-57.
- Alves, J. Q., Martins, T. J., & Andrade, J. J. (2021). Documentos normativos e orientadores da educação básica: a nova BNCC e o ensino de química. *Currículo sem fronteiras*, 21(1), 241-268.
- Andrade, N. O. (2019). *Modelos confeccionados em impressora 3D para o ensino de geometria molecular em química* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Acre, Rio Branco, Acre).
- Araújo, E. M. F. M. (2019). *Desenvolvimento de aplicativos educacionais para química: ferramentas para o aprendizado de configuração eletrônica e geometria molecular* (Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro).
- Astolfi, J. P., & Develay, M. (1990). *A didática das ciências*. Campinas, SP: Papirus.

- Bacega, T. (2020). *Estrutura química para o 9º ano do ensino fundamental: uma proposta de ensino envolvendo tecnologia digital com vistas à aprendizagem significativa* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Rio Grande do Sul).
- Baldock, B. L., Blanchard, J. D., & Fernandez, A. L. (2021) Student discovery of the relationship between molecular structure, solubility, and intermolecular forces. *J. Chem. Educ.*, 98(12), 4046–4053.
- Barnea, N. (2000). 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.
- Barros, A. P. M. (2018). *Recursos didáticos para o ensino de geometria molecular á alunos cegos em classes inclusivas* (Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, Paraíba).
- Bertalli, J. G. (2010). *Ensino de geometria molecular, para alunos com e sem deficiência visual, por meio de modelo atômico alternativo* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul).
- Birk, J. P., & Kurtz, M. J. (1999). Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. *J. Chem. Educ.*, 76(1), 124-128.
- Bolton, K., Saalman, E., Christie, M., Ingerman, A., & Linder, C. (2008). SimChemistry as an active learning tool in chemical education. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 9, 2773–284.
- Bouzon, J. D. (2015). *Metodologias didáticas alternativas para o ensino de geometria molecular e soluções: estratégias para a construção do conhecimento* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro).
- Brown, C. E., Alrmuny, D., Williams, M. K., Whaley, B., & Hyslop, R. M. (2020) Visualizing molecular structures and shapes: a comparison of virtual reality, computer simulation, and traditional modeling. *Chemistry Teacher International*, 3(1), 69-80.
- Cane, E. C., & Williams, D. P. (2018). Prediction! The VSEPR game: using cards and molecular model building to actively enhance students' understanding of molecular geometry. *Journal of Chemical Education*, 95(6), 991-995.
- Carillo, L., Lee, C., & Rickey, D. (2005). Enhancing Science Teaching by doing MORE A framework to guide chemistry students' thinking in the laboratory. *Sci. Teach.*, 72(7), 60–65.
- Carneiro, M. H. S. (1997). As imagens no livro didático. In: 1º Encontro nacional de pesquisa em ensino de ciências. Águas de Lindóia, SP, *Atas do 1º Encontro nacional de pesquisa em ensino de ciências*, 366-373.
- Carvalho, C. R. S. (2009). *Software educativo: um instrumento para explorar conceitos nas representações simbólicas no ensino da geometria molecular* (Dissertação de Mestrado, Universidade Luterana do Brasil, Canoas, Rio Grande do Sul).
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique: perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Grenoble, 12(1), 73-112.
- Clauss, A. D., Nelsen, S. F., Ayoub, M., Moore, J. W., Landis, C. R., & Weinhold, F. (2014). Rabbit-ears hybrids, VSEPR sterics, and other orbital anachronisms. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 15, 417-434, 2014.
- Coll, C., et al. (2006). *O construtivismo na sala de aula*. São Paulo: Ática.

- Cooper, M. M., Grove, N., & Underwood, S. M. (2010). Lost in Lewis structures: An investigation of student difficulties in developing representational competence. *J. Chem. Ecol.*, 87, 869–874.
- Cooper, M. M., Underwood, S. M., & Hilley, C. Z. (2012). Development and validation of the implicit information from Lewis structures instrument (IILSI): do students connect structures with properties? *Chem. Educ. Res. Pract.*, 13, 195–200.
- Donaghy, K. J., & Saxton, K. J. (2012). Connecting geometry and chemistry: a three-step approach to three-dimensional thinking. *J. Chem. Educ.*, 89(7), 917–920.
- Fabri, P. H. (2016). *Estudo da motivação do estudante trabalhando com modelos moleculares concretos, validada por meio de vídeo e áudio* (Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro).
- Ferk, V., Vrtacnik, M., Blejec, A., & Gril, A. (2003). Students' understanding of molecular structure representations. *International Journal of Science Education*, 25(10), 1227-1245.
- Goddard, T. D., Brilliant, A. A., Skillman, T. L., Vergenz, S., Tyrwhitt-Drake, J., Meng, E. C., & Ferrin, T. E. (2018). Molecular visualization on the holodeck. *Journal of Molecular Biology*, 430(21), 3982-3996.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro- and Microchemistry. *Sch. Sci. Rev.*, 64, 377–379.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? things are seldom what they seem. *J. Comput. Assist. Lear.*, 7(2), 75–83.
- Joshua, S., & Dupin, J. J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Karonen, M., Murtonen, M., Sodervik, I., Manninen, M., & Salomaki, M. (2021). Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: the Lewis structure as an example. *Educ. Sci.*, 11(6), 258.
- Kitchenham, B. A. (2004). *Procedures for Performing Systematic Reviews*. Tech. Report TR/SE - 0401, Keele University.
- Lamoureux, G., & Ogilvie, J. F. (2019a). Orbitals in general chemistry, part I: The great debate. *Química Nova*.
- Lamoureux, G., & Ogilvie, J. F. (2019b). Hybrid atomic orbitals in organic chemistry. Part 2: Critique of practical aspects. *Quim. Nova*, 42(7), 1-6.
- Lima, J. O. G., & Almeida, G. B. (2020). Elaboração de holograma para o ensino de geometria molecular. *ENCITEC*, Santo Ângelo, 10(1), 73-87.
- Maia, N. C. (2019). *Origami arquitetônico como recurso pedagógico para a compreensão da geometria espacial de moléculas* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte).
- Manfio, R. A. (2019). *Utilização e avaliação de software para geometria molecular no ensino médio* (Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná).
- Martina, A. R. (2017). 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.
- Martins, M. G. (2017). *Avaliação didática dos materiais alternativos no conteúdo de geometria molecular: uma proposta para o ensino de química*. (Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Estado do Ceará, Fortaleza, Ceará).

- Martins, M. G., Freitas, G. F. G., & Vasconcelos, P. H. M. (2018). A utilização de materiais alternativos no ensino de química no conteúdo de geometria molecular. *Revista Thema*, 15(1), 44-50.
- 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*, 83(4), 622.
- Moura, J. A. S. (2010). *A Realidade Virtual como uma ferramenta para o ensino da Geometria Molecular* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais).
- Neto, J. R. F. (2007). *Tecnologias no ensino de geometria molecular* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais).
- Ogden, M. (2017). 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.*, 94, 897-902.
- Özmen, H., Demircioğlu, H., & Demircioğlu, G. (2008). The effects of conceptual change texts accompanied with animations on overcoming 11th grade students' alternative conceptions of chemical bonding. *Computers & Education*, 52(3), 681-695.
- Ribeiro, R. D. R., Sutério, G. M., & Bastos, A. R. B. (2018). Geometria molecular acessível para alunos com deficiência visual. *Educação química em ponto de vista*, 2(1), 161-172.
- Rocha, N. M., Vasconcelos, A. K. P., Filho, V. T. N., Sampaio, C. G., & Barroso, M. C. S. (2021). A realidade aumentada como recurso auxiliar para a aprendizagem significativa de geometria molecular. *Research, Society and Development*, 10(10), e21710109027.
- Santos, A. C. L. (2019). *Ensino de geometria molecular com aplicativo de simulação digital: possíveis contribuições para uma aprendizagem significativa* (Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Paraná).
- Savchenkov, A. V. (2020). 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.*, 97, 1682-1687.
- Sebata, C. E. (2006). *Aprendendo a imaginar moléculas: uma proposta de ensino de geometria molecular* (Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal).
- Silva, A. P. M. (2016). *Geometria molecular: elaboração, aplicação e avaliação de uma sequência didática envolvendo o lúdico* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro).
- Silva, C. S. (2020). *O Jogo e a teoria do processamento da informação no ensino de geometria molecular*. (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás).
- Silva, C. S., & Soares, M. H. F. B. (2021). GeomeQuímica: um jogo baseado na Teoria Computacional da Mente para a aprendizagem de conceitos de geometria molecular. *Quím. nova esc.*, São Paulo, 43(4), 371-379.
- Silva, E. A. (2014). *SisMol3D: desenvolvimento de um Software Educacional para o ensino de estruturas moleculares em química* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, Amazonas).
- Silva, K. S. (2018). *A neurociência cognitiva como base da aprendizagem de geometria molecular: um estudo sobre atributos do funcionamento cerebral relacionados à memória de longo prazo* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe).

- Silva, K. S., & Correia, P. M. (2024). Perspectiva docente acerca da aprendizagem de geometria molecular: análise de entrevista mediada com mapa conceitual. *ENCITEC*, 14(1), 82-97.
- Silva, K. S., & Correia, P. R. M. (2023a). Aprimorando a percepção espacial em geometria molecular através do estudo com mapas conceituais e tecnologia de realidade aumentada. *Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*, 16(2), 335-353.
- Silva, K. S., & Correia, P. R. M. (2023b). Estratégia para identificar erros conceituais de química: incompreensões em torno da aprendizagem de geometria molecular. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 23, e42082.
- Silva, K. S., & Fonseca, L. S. (2021). Neurociência e educação: estratégias multissensoriais para a aprendizagem de geometria molecular. *Investigações em Ensino de Ciências*, 26(1), 01-26.
- Silva, K. S., Fonseca, L. S., & Freitas, J. D. (2018). Uma breve história da geometria molecular sob a perspectiva didático-epistemológica de Guy Brousseau. *Acta Scientiae*, 20(4), 626-647.
- Silva, K. S., Fonseca, L. S., Silva, L. P., & Carvalho, E. F. (2020). Proposta de análise praxeológica de noções de química em documentos oficiais e livros didáticos. *Ciência & Educação*, 26, e20012.
- Stowe, R. L., Herrington, D. G., Mckay, R. L., & Cooper, M. M. (2019). The impact of core-idea centered instruction on high school students' understanding of structure–property relationships. *Journal of Chemical Education*, 96(7), 1327-1340.
- Uyulgan, M. A., Akkuzu, N., & Alpat, S. (2014). Assessing the students' understanding related to molecular geometry using a two-tier diagnostic test. *Journal of Baltic Science Education*, 13(6), 839-855.