

MODELAGEM MOLECULAR E VISUALIZAÇÃO DIGITAL NO ENSINO DE QUÍMICA: ESTRATÉGIAS DIDÁTICAS PARA A CONSTRUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO E DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

**MOLECULAR MODELING AND DIGITAL VISUALIZATION IN CHEMISTRY
EDUCATION: DIDACTIC STRATEGIES FOR THE DEVELOPMENT OF
SCIENTIFIC THINKING AND MEANINGFUL LEARNING**

Ciências Exatas e da Terra, Ciências Sociais Aplicadas • 15/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789451283](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789451283)

Alexsandro da Silva Cavalcanti¹

Maria do Socorro Evangelista Garreto²

Idelvan Nascimento da Silva³

Stanrley Wilker Trindade Bandeira⁴

Elidiane de Carvalho Ribeiro⁵

Arnoldo Menezes da Silva⁶

Gleudson Luiz Cavalcante Aguiar⁷

Agnaldo Braga Lima⁸

RESUMO

O ensino de Química apresenta dificuldades específicas decorrentes da necessidade de compreender fenômenos que se manifestam no nível macroscópico, mas cuja explicação depende de entidades, interações e transformações submicroscópicas representadas por linguagens simbólicas próprias. Nesse contexto, a modelagem molecular e as tecnologias de visualização digital têm sido progressivamente incorporadas às práticas pedagógicas como instrumentos capazes de tornar estruturas, interações e processos químicos intelectualmente acessíveis, permitindo que estudantes construam, manipulem, comparem e revisem representações de sistemas que não podem ser diretamente observados. O presente artigo analisa criticamente as contribuições da modelagem molecular, das simulações computacionais, das animações, da realidade aumentada, da realidade virtual e de outros ambientes digitais para o ensino de Química, enfatizando sua relação com a aprendizagem significativa, a competência representacional e a construção do pensamento científico. Metodologicamente, desenvolveu-se uma revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, fundamentada em estudos clássicos da educação química, revisões sistemáticas recentes, pesquisas empíricas e trabalhos sobre aprendizagem multimídia e representação científica, com atualização da literatura até setembro de 2026. As evidências indicam que recursos digitais apresentam maior potencial quando permitem estabelecer relações explícitas entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico, possibilitam manipulação ativa de modelos e estão integrados a estratégias investigativas orientadas por problemas, hipóteses e explicações. Uma revisão sistemática de 2024 identificou 64 estudos sobre atividades voltadas ao nível submicroscópico e mostrou diversidade de abordagens, com forte presença de atividades investigativas e

experimentos associados a representações. Revisões contemporâneas sobre realidade aumentada, realidade virtual e simulações PhET também apresentam resultados predominantemente favoráveis ao entendimento conceitual e ao engajamento, embora indiquem heterogeneidade metodológica, dependência da mediação docente e menor atenção a transferência, pensamento científico e resultados de longo prazo. Conclui-se que a visualização não deve ser compreendida como simples recurso destinado a “mostrar moléculas”, pois modelos digitais são representações seletivas, com pressupostos e limitações que precisam ser explicitamente analisados. Seu maior valor pedagógico emerge quando o estudante deixa de ser observador passivo e passa a utilizar modelos como ferramentas para explicar, prever, argumentar, testar hipóteses e relacionar evidências macroscópicas a mecanismos moleculares.

Palavras-chave: Ensino de Química; modelagem molecular; visualização digital; aprendizagem significativa; representações químicas; pensamento científico.

ABSTRACT

Chemistry education presents specific difficulties arising from the need to understand phenomena manifested at the macroscopic level while explaining them through submicroscopic entities, interactions and transformations represented by specialized symbolic languages. Molecular modeling and digital visualization technologies have consequently been incorporated into educational practices as tools capable of making otherwise unobservable chemical structures and processes intellectually accessible, allowing learners to construct, manipulate, compare and revise representations of chemical systems. This article critically analyzes the contributions of molecular modeling, computer simulations,

animations, augmented reality, virtual reality and other digital environments to chemistry education, with emphasis on meaningful learning, representational competence and the development of scientific thinking. Methodologically, a qualitative systematized review with narrative synthesis was conducted using foundational chemistry education research, recent systematic reviews, empirical studies and literature on multimedia learning and scientific representation, with evidence updated through September 2026. Findings indicate that digital resources are most educationally valuable when they explicitly connect macroscopic, submicroscopic and symbolic levels, allow active manipulation of models and are embedded in inquiry-oriented activities involving problems, hypotheses and explanations. A 2024 systematic review identified 64 studies addressing the submicroscopic level and demonstrated a wide range of instructional approaches, particularly inquiry-based activities and experiments integrated with representations. Contemporary reviews of augmented reality, virtual reality and PhET simulations also report predominantly favorable results for conceptual understanding and engagement, although methodological heterogeneity, dependence on teacher mediation and limited attention to transfer, scientific reasoning and long-term learning remain important limitations. Visualization should therefore not be understood simply as a way to “show molecules”, since digital models are selective representations with assumptions and limitations that must become explicit objects of instruction. Their greatest pedagogical value emerges when students move beyond passive observation and use models to explain, predict, argue, test hypotheses and connect macroscopic evidence with molecular mechanisms.

Keywords: Chemistry education; molecular modeling; digital

visualization; meaningful learning; chemical representations; scientific thinking.

1. INTRODUÇÃO

A aprendizagem da Química exige do estudante um tipo de raciocínio particularmente complexo porque grande parte daquilo que precisa ser compreendido não pode ser diretamente observado. Mudanças de cor, formação de precipitados, variação de temperatura, liberação de gases, dissolução, mudança de estado físico e alterações de propriedades são percebidas no nível macroscópico, mas sua explicação requer recorrer a átomos, moléculas, íons, elétrons, interações intermoleculares, distribuições eletrônicas e reorganizações estruturais que pertencem a uma escala submicroscópica. Além disso, a Química dispõe de um sistema simbólico próprio, composto por fórmulas, equações, diagramas, gráficos, representações de orbitais, mecanismos de reação, estruturas de Lewis e diferentes formas de notação estrutural. A dificuldade do estudante não consiste, portanto, apenas em memorizar conceitos ou realizar cálculos, mas em aprender a estabelecer correspondências entre observações, modelos invisíveis e símbolos convencionais. Johnstone (1991) mostrou que parte das dificuldades no ensino de Ciências decorre precisamente da sobrecarga cognitiva produzida quando o estudante precisa processar simultaneamente informações localizadas em diferentes níveis de representação. Essa estrutura conceitual tornou-se um dos referenciais mais influentes da pesquisa em educação química e permanece particularmente útil para compreender o potencial e os limites das tecnologias de visualização.

A modelagem molecular surge nesse cenário como uma estratégia capaz de fornecer representação externa para entidades e relações que, de outra forma, dependeriam exclusivamente da construção mental do estudante. Modelos físicos de esfera e bastão desempenharam historicamente essa função ao permitir que moléculas fossem manipuladas em três dimensões, tornando visíveis conceitos como geometria, estereoquímica, isomeria e conformação. Com a expansão dos computadores e, posteriormente, de dispositivos móveis, interfaces tridimensionais, realidade aumentada e realidade virtual, as possibilidades de representação tornaram-se muito mais amplas. O estudante pode atualmente girar uma estrutura molecular, modificar ângulos de ligação, comparar conformações, observar orbitais, investigar distribuição de densidade eletrônica, acompanhar partículas durante uma transformação, alterar variáveis de uma simulação ou transitar entre representações bidimensionais e tridimensionais. Essas possibilidades são didaticamente relevantes porque modelagem e visualização deixam de funcionar apenas como ilustrações e podem tornar-se instrumentos de investigação, desde que sejam incorporadas a atividades que exijam interpretação e tomada de decisão.

Entretanto, mostrar uma molécula em uma tela não equivale automaticamente a promover compreensão. As representações digitais são construções que destacam determinados aspectos e ocultam outros, podendo inclusive produzir novas concepções inadequadas quando interpretadas literalmente. Uma estrutura em esfera e bastão representa relações espaciais de modo eficiente, mas pode induzir o estudante a imaginar ligações como hastes rígidas e átomos como esferas sólidas de tamanho arbitrário. Uma superfície de potencial eletrostático utiliza convenções cromáticas que não

existem fisicamente da maneira como aparecem na tela; uma animação de partículas pode sugerir trajetórias determinísticas ou dimensões incompatíveis com a escala molecular; orbitais são frequentemente desenhados como superfícies fixas, embora representem distribuições probabilísticas. A revisão sistemática recente de metáforas e mapeamentos no ensino de Química enfatiza precisamente que representações e analogias são pedagogicamente úteis quando seus limites são explicitados, pois estudantes podem transferir para o domínio químico características do modelo que não deveriam ser interpretadas literalmente.

A literatura em educação química demonstra ainda que competência representacional não é uma habilidade espontaneamente adquirida apenas pelo contato com imagens. Chittleborough e Treagust (2007), ao investigar estudantes universitários, mostraram que a capacidade de modelar e transitar entre níveis de representação pode ser desenvolvida mediante instrução e prática. Treagust, Chittleborough e Mamiala (2003) observaram que explicações químicas mais relacionais dependem da articulação entre níveis submicroscópico e simbólico, mas também constataram que estudantes nem sempre compreendem o papel que uma representação assume para o professor. Esses achados permanecem centrais para o uso de ferramentas digitais: uma interface sofisticada pode tornar a estrutura mais clara para um especialista e, simultaneamente, aumentar a confusão de um iniciante que não domina as convenções utilizadas. A tecnologia não elimina, portanto, a necessidade de ensinar explicitamente como ler, construir, comparar e criticar representações químicas.

A pesquisa contemporânea reforça a centralidade do nível submicroscópico. Laohapornchaiphan e Chenprakhon (2024)

realizaram revisão sistemática de 64 estudos recuperados nas bases Scopus e ERIC sobre atividades destinadas a promover a aprendizagem desse nível e identificaram ampla diversidade de abordagens, abrangendo experimentos acompanhados de representações, atividades computacionais, modelos, desenhos e estratégias investigativas. A maior concentração ocorreu em conteúdos relacionados à matéria e entre estudantes do ensino médio e dos primeiros anos do ensino superior, enquanto a aprendizagem baseada em investigação foi uma das orientações pedagógicas predominantes. O resultado é significativo porque demonstra que o recurso visual tende a ser mais útil quando integrado a uma ação cognitiva mais ampla, na qual o estudante observa, interpreta, prevê e explica. Em outras palavras, o valor pedagógico não está apenas na visualização em si, mas na atividade intelectual que a visualização torna possível.

Essa perspectiva também permite aproximar modelagem molecular e aprendizagem significativa. A teoria da assimilação associada a Ausubel e desenvolvida posteriormente por Novak distingue formas de aprendizagem que variam entre memorização predominantemente mecânica e integração substantiva de novos conhecimentos às estruturas cognitivas já existentes. No ensino de Química, Grove e Bretz (2012) argumentam que essas formas não devem ser tratadas como categorias rigidamente separadas, mas como pontos de um continuum em que os estudantes podem apresentar graus diferentes de integração conceitual. A visualização digital pode contribuir para essa integração quando conecta uma fórmula simbólica a uma estrutura molecular e a um comportamento observável, mas pode igualmente favorecer aprendizagem superficial quando o estudante apenas reproduz uma imagem ou segue instruções de software sem compreender as

relações representadas. Assim, “usar tecnologia” não é sinônimo de “promover aprendizagem significativa”; a diferença depende do desenho da atividade e da forma como conhecimentos prévios são mobilizados, confrontados e reorganizados.

O desenvolvimento do pensamento científico acrescenta uma dimensão ainda mais exigente ao debate. Pensar cientificamente envolve formular perguntas, construir modelos explicativos, produzir previsões, interpretar evidências, comparar hipóteses, reconhecer incertezas e revisar explicações. Um software molecular pode contribuir para esse processo quando o estudante utiliza o modelo para prever qual isômero terá determinada geometria ou qual mudança estrutural explicaria uma propriedade, mas sua utilização torna-se cognitivamente limitada quando a tarefa consiste apenas em abrir uma molécula previamente construída e observar sua imagem. A diferença entre consumo e construção de modelos é fundamental. A modelagem científica é uma prática epistêmica: modelos não são fotografias da realidade, mas instrumentos para representar determinados aspectos de sistemas, realizar inferências e testar a consistência de explicações. Quando a educação química ensina o estudante a interrogar o modelo — perguntando o que ele representa, o que omite e em quais condições é útil —, a visualização deixa de ser acessório e passa a contribuir para o desenvolvimento de formas de raciocínio semelhantes às utilizadas nas práticas científicas.

A evolução tecnológica expandiu esse potencial. Simulações interativas como as da plataforma PhET permitem alterar variáveis e observar mudanças representacionais em tempo real; ambientes tridimensionais podem facilitar a manipulação de estruturas; realidade aumentada projeta objetos moleculares no espaço físico e

possibilita examiná-los de diferentes perspectivas; realidade virtual imersiva permite explorar estruturas e ambientes laboratoriais em escala simulada. Uma revisão sistemática publicada em 2026 sobre simulações PhET em Ciências e Química identificou 14 estudos empíricos entre 2020 e 2026 e relatou resultados predominantemente favoráveis ao desempenho e à compreensão conceitual, embora tenha destacado diferenças de desenho metodológico, menor investigação de resultados afetivos e habilidades de ordem superior e dependência da facilitação docente. No Brasil, revisão integrativa publicada igualmente em 2026 identificou 12 artigos sobre a utilização do PhET na Educação Básica e descreveu seu potencial para tornar conceitos abstratos mais visualizáveis e investigativos, ao lado de limitações relacionadas à infraestrutura e à formação profissional.

A realidade aumentada também recebeu atenção crescente. Ribič e Devetak (2024) analisaram 46 trabalhos empíricos publicados entre 2018 e 2023 relacionados ao uso de realidade aumentada no entendimento dos três níveis representacionais da Química. Os estudos concentraram-se sobretudo na mensuração de aprendizagem e aceitação tecnológica e indicaram potencial para apoiar a compreensão de representações tridimensionais, embora a literatura permaneça heterogênea. Mazzuco *et al.* (2023), em revisão sistemática sobre realidade aumentada no ensino e aprendizagem de Química, chegaram a conclusão semelhante ao identificar expansão do campo acompanhada de grande diversidade de públicos, métodos e tecnologias. Na educação em Engenharia Química, revisão sistemática de 2024 selecionou 22 artigos e destacou aplicações em química molecular, operações unitárias e processos, além de percepções favoráveis de professores e estudantes. Esses resultados sugerem que tecnologias imersivas e

aumentadas ampliam possibilidades de representação, mas a qualidade do resultado continua vinculada à atividade pedagógica e não à novidade tecnológica isoladamente.

A realidade virtual imersiva constitui exemplo ainda mais evidente da diferença entre potencial e evidência. Guruloo e Osman (2023), em revisão sistemática sobre laboratórios virtuais de Química, identificaram concentração geográfica da pesquisa em poucos países e crescimento acentuado após 2021, com aplicações destacadas em segurança laboratorial e estruturas atômico-moleculares. Entretanto, imersão e sensação de presença não são, em si mesmas, objetivos educacionais. Um ambiente virtual pode aumentar engajamento e reduzir limitações logísticas de determinados experimentos, mas também pode produzir carga cognitiva adicional, distração ou foco excessivo na interface. Schröder *et al.* (2023) discutem justamente quais características da realidade virtual podem apoiar uma educação química significativa e destacam a importância de conexão macro-micro, contexto, necessidade cognitiva e participação do estudante. Isso reforça uma conclusão recorrente do campo: a tecnologia possui maior valor quando está subordinada à estrutura epistemológica da Química e às necessidades do aprendiz.

Diante dessa literatura, a questão norteadora do presente estudo é: **de que maneira a modelagem molecular e as tecnologias de visualização digital podem favorecer a construção do pensamento científico e da aprendizagem significativa em Química, e quais condições pedagógicas determinam se esses recursos produzem compreensão ou apenas observação superficial de representações?** O objetivo geral consiste em analisar criticamente as evidências sobre modelagem e visualização

digital no ensino de Química. Como objetivos específicos, pretende-se discutir a relação entre níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico; analisar competência representacional e modelos mentais; avaliar contribuições de simulações, animações, realidade aumentada e realidade virtual; discutir princípios de aprendizagem significativa e carga cognitiva; examinar o papel da mediação docente; identificar riscos de concepções equivocadas e sobrecarga visual; e propor estratégias didáticas nas quais o estudante utilize representações para construir explicações, previsões e argumentos científicos.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido como **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa**, metodologia considerada mais adequada diante da heterogeneidade dos objetos, tecnologias, níveis educacionais e desfechos presentes na literatura. A expressão “visualização digital” reúne intervenções significativamente diferentes: imagens estáticas tridimensionais, animações moleculares, softwares de construção de moléculas, simulações manipuláveis, ambientes de realidade aumentada, realidade virtual imersiva, laboratórios virtuais e aplicações baseadas em dispositivos móveis. Os estudos também investigam resultados distintos, incluindo compreensão conceitual, competência representacional, raciocínio espacial, desempenho em testes, engajamento, motivação, percepção de usabilidade, capacidade de transferência e desenvolvimento de modelos mentais. Em razão dessa diversidade, a combinação desses resultados em uma única metanálise própria produziria uma medida de interpretação duvidosa.

A busca foi atualizada até setembro de 2026 e orientada por combinações dos termos “chemistry education”, “molecular modeling”, “molecular visualisation”, “molecular visualization”, “digital visualization”, “multiple representations”, “submicroscopic representation”, “chemical representations”, “computer simulation”, “PhET”, “augmented reality”, “virtual reality”, “molecular animation”, “spatial skills”, “meaningful learning” e “representational competence”. Foram priorizados periódicos especializados em educação química e educação científica, além de revisões sistemáticas recentes. Artigos clássicos foram preservados quando estabeleciam conceitos ainda utilizados na literatura contemporânea, especialmente a estrutura representacional de Johnstone e estudos sobre competência representacional, modelagem e aprendizagem significativa.

Foram incluídos trabalhos que analisassem a utilização ou compreensão de representações químicas, modelos moleculares, simulações, visualizações digitais ou tecnologias imersivas em contextos educacionais e que apresentassem implicações para aprendizagem conceitual, raciocínio ou práticas científicas. Revisões sobre recursos tecnológicos mais amplos foram incluídas quando possuíam um componente explicitamente relacionado à Química. Estudos puramente computacionais destinados à pesquisa química, sem aplicação educacional, foram excluídos do núcleo da síntese. Da mesma forma, a qualidade visual ou tecnológica de um programa não foi utilizada como indicador independente de eficácia pedagógica.

A literatura foi organizada em cinco eixos: **competência representacional e níveis da Química**, abrangendo relações entre macro, submicro e simbólico; **modelagem como prática científica**,

envolvendo construção, manipulação e avaliação de modelos; **visualização digital e aprendizagem conceitual**, incluindo animações e simulações; **tecnologias imersivas e espaciais**, como realidade aumentada e virtual; e **condições pedagógicas de eficácia**, relacionadas a mediação docente, investigação, desenho multimídia, carga cognitiva e transferência. Essa estrutura permite distinguir a presença de uma tecnologia de sua função didática.

Foi adotado cuidado especial com a expressão **aprendizagem significativa**, frequentemente utilizada na literatura educacional de forma ampla. Neste artigo, o termo não é empregado como sinônimo de aula interessante ou agradável, mas como processo em que novos conhecimentos são integrados de maneira substantiva aos conhecimentos já existentes, permitindo reorganização e utilização em novas situações. Grove e Bretz (2012) oferecem uma interpretação especialmente pertinente ao ensino de Química ao propor um continuum entre memorização mecânica e aprendizagem significativa. Nesse sentido, um aumento imediato de pontuação em um teste de reconhecimento após uso de uma animação pode constituir resultado positivo, mas não demonstra necessariamente aprendizagem significativa ou capacidade de transferência.

Também foi adotada distinção entre **visualização, animação, simulação e modelagem**. Uma visualização pode simplesmente apresentar uma representação; uma animação adiciona mudança temporal, mas o estudante pode permanecer observador; uma simulação permite alterar variáveis e acompanhar consequências; e a modelagem envolve construção, modificação ou uso deliberado de representações para explicar e prever fenômenos. Essa distinção é conceitualmente importante porque os diferentes recursos impõem

atividades cognitivas distintas. Suits e Sanger (2013) destacam que visualizações dinâmicas podem tornar o nível particulado menos abstrato, enquanto pesquisas posteriores mostram que a aprendizagem depende de como os estudantes interagem e interpretam aquilo que observam.

Não foi produzido um fluxograma PRISMA específico com números de registros identificados, duplicados ou excluídos. Embora tenham sido realizadas buscas estruturadas e utilizadas revisões sistemáticas auditáveis como fontes centrais, não houve exportação bibliográfica integral, deduplicação formal, dupla triagem independente e documentação individual de exclusões especificamente para este manuscrito. Em respeito à integridade científica, nenhum quantitativo artificial foi criado. A denominação **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa** corresponde, portanto, ao procedimento efetivamente adotado.

3. REPRESENTAÇÕES QUÍMICAS, MODELOS MENTAIS E PENSAMENTO CIENTÍFICO

O chamado “triplete da Química” representa um dos fundamentos mais úteis para interpretar a função das ferramentas digitais. No nível macroscópico, o estudante observa propriedades e transformações; no submicroscópico, recorre a partículas e interações que explicam aquilo que observa; no simbólico, utiliza uma linguagem convencional para representar quantidades, estruturas e transformações. A compreensão química exige transitar entre esses domínios e reconhecer que nenhum deles é uma reprodução completa do fenômeno. Uma equação como $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ representa proporções e identidades químicas, mas não mostra mecanismo, distribuição espacial, colisões, energia ou

comportamento macroscópico do sistema. Uma animação molecular pode mostrar partículas reagindo, mas precisa ser relacionada à equação e à evidência experimental para adquirir significado químico. Johnstone (1991) argumentou que a apresentação simultânea de diferentes formas de informação pode exceder a capacidade de processamento do aprendiz quando as conexões não estão estabelecidas, problema que continua relevante em ambientes digitais visualmente ricos.

Treagust, Chittleborough e Mamiala (2003) demonstraram que a utilização simultânea dos níveis submicroscópico e simbólico pode contribuir para compreensão relacional quando o estudante entende o papel de cada representação. Contudo, os autores também encontraram discrepâncias entre o significado presumido pelo professor e aquele efetivamente construído pelo estudante. Esse resultado é decisivo para interpretar a tecnologia educacional. Quando um docente projeta uma animação de dissolução, pode acreditar que a visualização “mostra claramente” hidratação, dissociação e movimento das espécies. O estudante, porém, pode interpretar que moléculas de água “quebram” o cristal como objetos sólidos ou concluir que as partículas deixam de existir por não perceber determinada representação. A aprendizagem exige verbalizar e testar essas interpretações em vez de presumir que a imagem seja autoexplicativa.

A competência representacional corresponde, assim, à capacidade de compreender convenções, selecionar representações adequadas, produzir novas representações e transitar entre elas. Não se trata apenas de reconhecer uma estrutura já desenhada. Um estudante competente deve, por exemplo, relacionar fórmula molecular e geometria, interpretar por que determinadas convenções são

utilizadas, reconhecer quais propriedades podem ser inferidas e identificar aquilo que a representação não permite concluir. Chittleborough e Treagust (2007) demonstraram que a capacidade de modelagem melhora com instrução e que avanços nessa habilidade acompanham melhor compreensão de conceitos submicroscópicos. Esse achado desafia a ideia de que alguns estudantes “simplesmente têm visão espacial” enquanto outros não: parte importante da competência pode ser ensinada e praticada.

A dimensão espacial adquire especial importância em conteúdos como geometria molecular, estereoquímica, conformação, cristalografia e interações biomoleculares. Harle e Towns (2011) e Stieff e Uttal (2015), entre outros pesquisadores do campo, argumentaram que habilidades espaciais possuem relação com desempenho em determinadas tarefas químicas e que ferramentas externas podem reduzir parte das demandas impostas à visualização mental. A revisão de Harle e Towns sobre promoção de habilidades espaciais em Química e Bioquímica observou aumento de intervenções instrucionais explícitas, embora em volume ainda inferior ao dedicado a outras competências. A conclusão pedagógica não deve ser que o software substitui a habilidade espacial, mas que pode funcionar como andaime cognitivo: inicialmente permite manipular externamente aquilo que o estudante ainda não consegue rotacionar ou transformar mentalmente e, progressivamente, pode ser retirado ou combinado com tarefas que exigem representação interna.

Um dos riscos da visualização é justamente produzir dependência da representação externa. Se o estudante somente responde corretamente quando o modelo tridimensional está disponível, mas não consegue interpretar uma fórmula em cunha e traço ou prever

uma relação espacial sem o software, ocorreu apoio ao desempenho imediato, mas transferência limitada. A pesquisa em educação química frequentemente encontra essa diferença entre resolver uma tarefa com auxílio e construir uma representação mental suficientemente flexível para resolver novas situações. Cooper e colaboradores destacam que visualizações construídas pelo próprio estudante podem tornar seu pensamento acessível ao professor e funcionar como recurso para aprender, mas resultados dependem da integração da tarefa ao raciocínio conceitual.

A modelagem científica acrescenta um passo além da competência representacional porque envolve compreender que modelos são ferramentas explicativas. No ensino tradicional, estudantes frequentemente recebem modelos já prontos: modelo de Bohr, VSEPR, orbitais, esfera e bastão ou superfícies eletrônicas. Uma abordagem mais próxima da prática científica convida o estudante a comparar modelos e perguntar por que determinado modelo explica um fenômeno melhor que outro. A geometria de uma molécula pode ser analisada por VSEPR em determinada etapa do curso e posteriormente reinterpretada à luz de orbitais moleculares; nenhuma dessas estruturas é uma fotografia literal. Essa progressão pode ajudar o estudante a compreender a natureza provisória e funcional dos modelos científicos.

As tecnologias digitais oferecem condições particularmente favoráveis a essa abordagem quando permitem modificar parâmetros. Em vez de apenas observar uma estrutura, o estudante pode alterar número de domínios eletrônicos, carga ou composição e acompanhar as consequências, formulando generalizações. Em uma simulação de equilíbrio, pode variar concentração ou temperatura e interpretar como o sistema se reorganiza; em uma

atividade de ligação, pode comparar representações de densidade eletrônica; em termodinâmica, pode relacionar distribuição de partículas a grandezas macroscópicas. A capacidade de testar rapidamente cenários transforma a ferramenta em ambiente de investigação, mas somente quando a atividade solicita previsão antes da manipulação e explicação depois do resultado. Se o estudante apenas move controles até “dar certo”, a interatividade pode produzir tentativa e erro sem formação de modelo.

A construção do pensamento científico depende ainda da argumentação. Modelos digitais podem fornecer evidências para que estudantes defendam explicações, comparem hipóteses e justifiquem conclusões. Uma atividade sobre forças intermoleculares, por exemplo, pode apresentar líquidos com propriedades macroscópicas distintas, permitir examinar representações moleculares e exigir que o estudante construa uma cadeia explicativa entre estrutura, interação e propriedade. Nesse formato, o modelo funciona como evidência interpretável, e não como resposta pronta. Essa prática aproxima a modelagem molecular das competências científicas de explicação e justificação e favorece aprendizagem mais profunda do que a mera identificação visual de uma geometria.

4. MODELAGEM MOLECULAR E VISUALIZAÇÃO DIGITAL COMO ESTRATÉGIAS DE APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

A aprendizagem significativa exige que novas informações encontrem relações substantivas com conhecimentos prévios e sejam reorganizadas em uma estrutura conceitual capaz de ser utilizada em contextos diversos. No ensino de Química, uma das principais dificuldades é que muitos estudantes desenvolvem

conhecimentos fragmentados: sabem balancear equações sem explicar o que acontece com as partículas, reconhecem uma fórmula sem relacioná-la à estrutura, ou resolvem cálculos estequiométricos sem compreender a transformação material representada. A modelagem molecular pode reduzir essa fragmentação quando atua como ponte entre diferentes representações, tornando possível associar o símbolo a uma entidade e a entidade a um comportamento observável. O ganho não provém da beleza da imagem, mas da possibilidade de construir uma rede de relações conceituais.

Grove e Bretz (2012) mostram que aprendizagem mecânica e significativa formam um continuum e que estudantes podem utilizar estratégias predominantemente memorizativas mesmo em contextos que aparentemente promovem compreensão. Isso significa que um professor pode introduzir modelagem molecular e ainda assim manter uma aula essencialmente mecânica se solicitar apenas que os estudantes reproduzam procedimentos padronizados no software. A tecnologia não modifica automaticamente a epistemologia da tarefa. Para favorecer aprendizagem significativa, o estudante deve precisar explicar por que construiu determinado modelo, relacioná-lo a conceitos prévios, comparar alternativas e utilizar o resultado em situações novas.

A aprendizagem do nível submicroscópico oferece um exemplo particularmente claro. Laohapornchaiphan e Chenprakhon (2024) verificaram que muitas intervenções analisadas em sua revisão sistemática combinaram representações com atividades experimentais e investigação, em vez de utilizar imagens isoladamente. A experimentação fornece o fenômeno macroscópico; a representação fornece um mecanismo possível; a investigação cria

a necessidade de relacionar ambos. Esse arranjo é mais consistente com aprendizagem significativa porque a visualização responde a um problema conceitual que surgiu a partir da observação.

Considere o ensino de dissolução. O procedimento experimental pode mostrar que um sólido desaparece visualmente ao ser adicionado à água, enquanto medições demonstram que a matéria continua presente. Uma animação pode representar íons separados e hidratados. Se a animação for exibida antes que o estudante formule qualquer explicação, ela pode funcionar apenas como informação recebida. Se, ao contrário, os estudantes inicialmente desenharem o que acreditam acontecer, confrontarem seus modelos com evidências e posteriormente compararem suas representações com a animação, o recurso digital participa de uma reconstrução conceitual. Essa sequência torna concepções iniciais visíveis e cria uma razão cognitiva para modificar o modelo.

A mesma lógica vale para equilíbrio químico. Muitos estudantes interpretam equilíbrio como estado em que reações “param” ou como igualdade das quantidades de reagentes e produtos. Uma simulação dinâmica pode representar transformações simultâneas e frequências de eventos, mas observar o movimento não garante compreender o conceito. Perguntas que solicitem previsão sobre o que acontecerá após uma perturbação, identificação do que permanece constante e justificativa em termos de taxas transformam a simulação em ambiente de raciocínio. A visualização deve ser acompanhada de uma tarefa que obrigue o estudante a traduzir movimento de partículas em linguagem conceitual e simbólica.

A visualização digital também permite representar aquilo que laboratórios convencionais não mostram. No experimento real, estudantes frequentemente acompanham cor, volume, massa ou temperatura, mas não observam moléculas. Uma integração efetiva pode alternar entre experimento, gráfico e modelo molecular, permitindo que o estudante desenvolva explicações multirrepresentacionais. Essa complementaridade é superior à oposição entre laboratório físico e virtual. Simulações não precisam substituir experiências práticas; podem oferecer um nível explicativo inacessível diretamente à observação.

A aprendizagem significativa depende ainda do conhecimento prévio. Uma animação molecular muito sofisticada pode ser inútil para um estudante que não reconhece símbolos, escalas ou convenções. A literatura sobre aprendizagem multimídia mostra que recursos visuais podem reduzir ou aumentar a carga cognitiva conforme o desenho e a expertise do aprendiz. Em Química, o risco é elevado porque a imagem frequentemente contém cor, movimento, setas, legendas, símbolos e gráficos simultaneamente. O professor precisa selecionar quais elementos são necessários e evitar a ideia de que mais informação visual sempre significa maior aprendizagem.

A revisão histórica de Wu, Krajcik e Soloway e análises posteriores em educação química mostraram que diferentes formas de visualização podem apoiar compreensão quando integradas à instrução, enquanto estudos também registraram efeitos modestos ou concepções alternativas. A revisão ampla de Cooper e Stowe (2018) sobre pesquisa em educação química destaca justamente que a eficácia das visualizações depende fortemente de seu

desenho e de como são usadas, não havendo consenso de que simples exposição seja suficiente.

A elaboração de modelos pelos estudantes representa uma estratégia especialmente promissora. Em vez de oferecer a representação final, o professor pode solicitar desenhos particulados, construção de moléculas ou produção de modelos digitais e utilizá-los como instrumento de diagnóstico. Ao comparar modelos antes e depois de uma atividade, é possível observar mudanças que testes numéricos convencionais podem não revelar. Um estudante pode acertar um cálculo de molaridade e simultaneamente representar incorretamente a solução em nível particulado; somente a produção de uma representação torna essa dissociação visível.

Essa abordagem também favorece metacognição. Ao justificar por que escolheu determinada forma ou distribuição de partículas, o estudante precisa refletir sobre seu próprio conhecimento. Quando posteriormente modifica o modelo diante de novas evidências, experimenta uma versão simplificada do processo científico de revisão de explicações. A aprendizagem significativa passa, então, a envolver não apenas adquirir o modelo correto, mas compreender por que uma representação anterior era insuficiente.

5. SIMULAÇÕES, ANIMAÇÕES E AMBIENTES INTERATIVOS NO ENSINO DE QUÍMICA

As simulações computacionais representam uma das tecnologias mais consolidadas no ensino de Ciências porque permitem modificar variáveis e observar consequências sem custos materiais, riscos laboratoriais ou limitações temporais de determinados experimentos. No ensino de Química, sua relevância aumenta

quando os parâmetros manipulados possuem representação simultaneamente macroscópica e particulada. O estudante pode alterar pressão e volume e observar colisões de partículas; adicionar soluto e acompanhar concentração; modificar temperatura e examinar distribuição de energia; ou alterar quantidade de reagente e relacionar partículas à equação química.

A revisão sistemática de Ningrum *et al.* (2026) sobre PhET incluiu 14 estudos publicados entre 2020 e 2026 e encontrou resultados predominantemente favoráveis em desempenho e compreensão conceitual. Ao mesmo tempo, os autores apontaram heterogeneidade de desenhos, menor atenção a habilidades de ordem superior e ausência de síntese quantitativa, concluindo que o benefício depende de desenho instrucional, mediação docente e acesso tecnológico. Essa qualificação é importante: estudos que comparam uma simulação cuidadosamente integrada a uma aula convencional pouco interativa podem atribuir à tecnologia efeitos que decorrem parcialmente da própria atividade pedagógica.

No contexto brasileiro, Scaramussa *et al.* (2026) analisaram 12 estudos sobre PhET na Educação Básica e identificaram contribuições para visualização de conceitos abstratos, dinamismo e investigação, além de limitações de infraestrutura e formação docente. O resultado demonstra que efetividade pedagógica e viabilidade institucional são dimensões diferentes. Uma ferramenta pode funcionar em condições experimentais e ainda encontrar obstáculos de implementação quando computadores são insuficientes, a conexão é instável ou professores não receberam formação para integrá-la às sequências didáticas.

O estudo de 2024 sobre simulações e capacidade de traduzir representações químicas na aprendizagem da natureza particulada da matéria oferece uma evidência particularmente relevante. Os autores enfatizam que compreender o conceito exige transitar entre representações macro, submicro e simbólicas e que a presença de múltiplas representações pode, simultaneamente, apoiar e aumentar a complexidade cognitiva. O resultado reforça a necessidade de *scaffolding*: o professor deve orientar progressivamente a atenção para relações relevantes, em vez de simplesmente apresentar todos os níveis na mesma tela.

Animações diferem das simulações porque geralmente não permitem intervenção sobre variáveis, mas podem representar processos temporalmente dinâmicos. Williamson e Abraham e pesquisas posteriores mostraram que animações de partículas podem melhorar compreensão de fenômenos como mudanças de estado. Sanger e colaboradores também identificaram redução de algumas concepções alternativas relativas à natureza particulada da matéria após uso de animações, embora o efeito dependa de como o recurso é utilizado.

O movimento apresenta vantagens e riscos. Uma imagem estática exige que o estudante infira transformação, enquanto uma animação torna a sequência explícita. Porém, a informação pode desaparecer rapidamente e exigir processamento simultâneo de vários elementos, aumentando carga cognitiva. Permitir pausa, repetição e controle da velocidade tende a favorecer análise, especialmente para iniciantes. Também é útil segmentar o processo e solicitar previsões em pontos intermediários, impedindo que a animação seja consumida como um vídeo sem reflexão.

A modelagem computacional possui potencial ainda maior quando permite construir estruturas. Uma aplicação empregada em 2023 para introduzir isomeria estrutural partiu da constatação de que estudantes iniciantes apresentam dificuldade em temas de forte componente visual e de que a manipulação de modelos pode favorecer a resolução de tarefas espacialmente exigentes. O ensino de isomeria é particularmente apropriado porque o estudante precisa compreender que moléculas com a mesma fórmula podem apresentar conectividades distintas e que uma representação bidimensional pode ocultar relações tridimensionais.

O mesmo princípio pode ser utilizado em geometria molecular. Em vez de memorizar tabelas de VSEPR, estudantes podem construir moléculas, prever a geometria, comparar o modelo digital e explicar discrepâncias. A tecnologia permite que erros sejam rapidamente testados e corrigidos, desde que a atividade não forneça a forma correta antes da previsão. O ciclo previsão-modelagem-comparação-explicação transforma o software em instrumento de pensamento.

Em Química Orgânica, a possibilidade de rotacionar estruturas é útil para conformações e estereoquímica, mas precisa ser combinada a representações bidimensionais. Um estudante que se torna competente apenas no modelo tridimensional interativo pode continuar apresentando dificuldade em projeções de Newman, Fischer ou fórmulas em perspectiva. A estratégia mais adequada exige traduções sucessivas: representar a mesma estrutura em diferentes sistemas, reconstruí-la digitalmente e explicar quais propriedades permanecem invariantes.

Em Físico-Química e Química Quântica, visualizações tornam conceitos matematicamente abstratos mais acessíveis, mas também podem promover reificação. Uma superfície de orbital não é a região “ocupada” por um elétron como um objeto; densidade eletrônica não é uma nuvem material literalmente colorida. Professores precisam explicitar que a visualização deriva de funções e escolhas de isovalor e que diferentes representações respondem a perguntas diferentes. A competência científica inclui reconhecer o processo de produção da imagem.

Esse ponto é crucial para o pensamento científico: a visualização digital deve ser tratada como dado mediado por modelo, e não como observação direta. Em pesquisa química, imagens computacionais resultam de cálculos, parâmetros e convenções. Ensinar essa característica ajuda o estudante a compreender que Ciências utilizam instrumentos e modelos para inferir fenômenos que não podem ser observados diretamente. A alfabetização visual torna-se, assim, também alfabetização epistemológica.

6. REALIDADE AUMENTADA, REALIDADE VIRTUAL E VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A realidade aumentada possui uma característica pedagógica singular ao integrar objetos virtuais ao espaço físico. Em Química, o estudante pode observar uma molécula tridimensional sobre uma superfície, deslocar-se ao redor dela ou manipulá-la com um dispositivo móvel. Esse recurso pode reduzir a dificuldade de converter representações bidimensionais em estruturas espaciais e aumentar a sensação de concretude. Entretanto, essa mesma concretude exige cautela, pois pode reforçar a impressão de que o modelo é literalmente a molécula. A estratégia didática deve,

portanto, aproveitar a manipulação espacial e simultaneamente discutir a natureza representacional do objeto.

A revisão sistemática de Ribič e Devetak (2024) analisou 46 estudos empíricos de realidade aumentada relacionados ao triplete da Química e verificou forte concentração em aprendizagem e aceitação tecnológica. O conjunto aponta potencial para aprendizagem, mas revela que grande parte das investigações ainda privilegia resultados imediatos e questionários de percepção. Essa distribuição deixa menos clara a contribuição específica para transferência, resolução de problemas inéditos e compreensão epistemológica de modelos.

Mazzuco *et al.* (2023) também identificaram expansão significativa da realidade aumentada no ensino de Química e diversidade de dispositivos, públicos e estratégias. A popularização de celulares reduz parcialmente a necessidade de infraestrutura especializada, mas cria outros desafios: diferenças de hardware, acesso desigual, manutenção de aplicativos e distrações associadas ao próprio dispositivo. A acessibilidade tecnológica precisa ser entendida como componente do planejamento pedagógico e não como problema externo ao método.

Na Engenharia Química, a revisão de 2024 sobre realidade aumentada mostrou aplicações em sistemas moleculares, processos e operações unitárias. O campo ilustra como a tecnologia pode representar sistemas em escalas muito diferentes: moléculas e equipamentos industriais. Essa flexibilidade é interessante porque a formação química e de engenharia exige precisamente transitar entre escalas. O estudante pode relacionar o comportamento de

partículas às propriedades de um fluido e, posteriormente, às condições de um processo.

A realidade virtual imersiva acrescenta presença e possibilidade de interação corporal. Guruloo e Osman (2023) encontraram crescimento do uso de laboratórios de realidade virtual e aplicações especialmente frequentes em segurança e estruturas atômicas ou moleculares. O laboratório virtual pode permitir repetição de procedimentos, treinamento sem consumo de reagentes e experiência em situações que seriam caras ou perigosas. Entretanto, ele não reproduz todos os aspectos sensoriais, materiais e sociais de um laboratório real. A resistência de uma pipeta, odores, manejo de resíduos, pequenas falhas de instrumentação e interação com materiais reais não são automaticamente transferidos do ambiente virtual.

Por isso, a realidade virtual deve ser pensada como complementar. Pode preparar estudantes para o laboratório, permitindo que compreendam procedimentos antes do encontro presencial, ou pode fornecer experiências que não seriam possíveis localmente. Em cursos com infraestrutura limitada, pode ampliar acesso a determinadas atividades, mas não deve ser apresentada como equivalência total da experiência experimental.

Schröder *et al.* (2023) propõem que realidade virtual pode apoiar uma educação química significativa quando incorpora contexto, necessidade de conhecer, participação do estudante e relações entre escalas macro e micro. Esse enquadramento é particularmente útil porque desloca o foco da imersão para a pedagogia. Uma atividade imersiva sem problema a resolver pode ser visualmente impressionante e educacionalmente superficial; um

ambiente menos sofisticado, mas estruturado em torno de previsão e evidência, pode produzir aprendizagem superior.

O efeito novidade também precisa ser considerado. Tecnologias recentes frequentemente elevam motivação e satisfação em intervenções curtas, mas parte desse resultado pode diminuir à medida que o recurso se torna familiar. Estudos de longo prazo e comparação com estratégias pedagógicas igualmente ativas são necessários para determinar o valor específico da imersão. A literatura atual ainda possui grande concentração em pequenas amostras, percepção e desempenho imediato, o que impede conclusões universais.

A possibilidade de desconforto físico também diferencia realidade virtual. Náusea, fadiga visual, dificuldade de adaptação e incompatibilidade com determinadas condições podem limitar participação. A tecnologia precisa oferecer alternativas para estudantes que não podem ou não desejam utilizá-la, evitando que um recurso destinado a ampliar acesso produza novas barreiras.

A acessibilidade deve incluir deficiência visual, motora e neurodiversidade. Interfaces altamente espaciais podem favorecer determinados aprendizes e criar dificuldades para outros. Legendas, descrição verbal, controle por diferentes dispositivos e alternativas não imersivas podem ampliar inclusão. A qualidade de uma inovação não deve ser medida apenas pela sofisticação tecnológica, mas pela diversidade de estudantes que consegue atender.

7. MEDIAÇÃO DOCENTE, DESENHO DIDÁTICO E FORMAÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO

A literatura analisada converge para um ponto central: a mediação docente é determinante para transformar visualização em aprendizagem. Ferramentas digitais podem tornar entidades invisíveis representáveis, mas não determinam quais relações o estudante perceberá, quais explicações construirá ou quais concepções revisará. O professor possui a função de selecionar a representação, explicitar convenções, organizar perguntas e criar oportunidades de comparação entre modelos.

Uma estratégia particularmente eficiente é solicitar **previsão antes da visualização**. Ao pedir que o estudante antecipe o comportamento de um sistema, o professor torna o modelo mental inicial explícito. A simulação ou animação passa, então, a funcionar como evidência que confirma ou desafia a previsão. Sem essa etapa, o estudante pode simplesmente aceitar o resultado apresentado e não reconhecer conflito com sua concepção anterior.

Após a visualização, deve haver **explicação**, e não apenas confirmação. Perguntas como “por que isso ocorreu?”, “qual parte do modelo sustenta sua interpretação?” e “como essa representação se relaciona à equação?” forçam a articulação entre níveis. Essa etapa é essencial para evitar que a atividade termine no reconhecimento perceptual.

A comparação entre representações também é poderosa. Um mesmo fenômeno pode ser apresentado como fotografia experimental, gráfico, equação e modelo molecular. Em vez de mostrar todos simultaneamente, o professor pode pedir aos estudantes que construam ligações progressivas e identifiquem qual informação aparece em cada forma. Essa estratégia transforma

a multiplicidade representacional de fonte de sobrecarga em objeto de aprendizagem.

Outra abordagem é utilizar **representações incorretas deliberadamente**. O professor pode apresentar dois modelos e perguntar qual explica melhor o fenômeno, ou mostrar uma animação contendo um erro conceitual e solicitar diagnóstico. Essa atividade desenvolve uma postura crítica diante das imagens e evita a associação entre aparência digital e autoridade científica.

A produção de modelos pelos estudantes precisa igualmente receber atenção. Desenhos submicroscópicos, estruturas digitais e representações explicativas oferecem dados sobre o pensamento que respostas de múltipla escolha não revelam. O professor pode comparar produções em diferentes momentos e avaliar não apenas o resultado final, mas a evolução da explicação.

Laohapornchaiphan e Chenprakhon (2024) mostram que atividades investigativas são recorrentes entre as intervenções voltadas ao nível submicroscópico. Isso sugere que visualização alcança maior coerência didática quando responde a perguntas. O estudante pode observar um fenômeno experimental, elaborar um modelo, utilizar uma simulação para testar sua explicação e posteriormente revisá-la. Esse ciclo aproxima a sala de aula de práticas científicas de modelagem.

A argumentação pode ser incorporada por meio de atividades em grupo. Estudantes produzem modelos diferentes e precisam defender qual representa melhor as evidências. O conflito deixa de ser apenas entre resposta individual e correção do professor e passa a envolver critérios públicos de avaliação: consistência com dados,

poder explicativo e capacidade de previsão. Essa dinâmica desenvolve entendimento sobre como modelos científicos são avaliados.

A avaliação também precisa acompanhar essa mudança. Se as aulas utilizam modelagem e visualização para produzir raciocínio, mas as provas avaliam somente memorização de fórmulas, estudantes recebem uma mensagem contraditória sobre o que realmente importa. Questões avaliativas podem exigir tradução entre representações, identificação de limitações de um modelo, previsão de comportamento molecular e explicação de um fenômeno observado.

A formação docente constitui uma condição institucional importante. Professores precisam dominar não apenas a interface tecnológica, mas a Química representada e os problemas didáticos associados. Treinar alguém para abrir um aplicativo é diferente de prepará-lo para identificar concepções alternativas e organizar uma sequência investigativa. A revisão brasileira sobre PhET e outras revisões recentes destacam lacunas de infraestrutura e formação como obstáculos recorrentes.

A escolha das ferramentas também precisa ser orientada por objetivo. Um modelo físico pode ser superior a um ambiente virtual quando a finalidade é manipulação espacial simples; uma animação pode ser suficiente para representar uma transformação; uma simulação é mais apropriada quando se deseja manipular variáveis; realidade virtual pode justificar-se quando a espacialidade ou o ambiente imersivo acrescentam informação relevante. Utilizar a tecnologia mais avançada disponível, independentemente da necessidade, aumenta custo e complexidade sem garantir benefício.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira convergência da literatura é que a dificuldade representacional não constitui um detalhe periférico do ensino de Química, mas parte estrutural da disciplina. Desde Johnstone até revisões recentes, os estudos mostram que estudantes precisam aprender a conectar fenômenos observáveis, entidades submicroscópicas e símbolos. A visualização digital é especialmente relevante porque oferece acesso externo ao domínio que não pode ser diretamente visto, mas seu efeito depende da construção das conexões entre representações.

A segunda convergência é que **modelos não são autoexplicativos**. Estudantes interpretam imagens a partir de conhecimentos prévios e podem atribuir características indevidas às representações. A competência representacional precisa, portanto, ser ensinada. Esse resultado aparece em pesquisas clássicas e permanece relevante diante de tecnologias mais sofisticadas.

A terceira convergência é que **interatividade possui valor quando está associada a uma tarefa intelectual**. Manipular uma molécula pode apoiar raciocínio espacial, mas mover a imagem sem previsão, pergunta ou explicação pode produzir apenas exploração perceptual. A mesma distinção vale para simulações: alterar controles aleatoriamente não equivale a investigação.

A quarta convergência é que **representações produzidas pelo próprio estudante possuem valor diagnóstico e formativo**. Desenhos e modelos revelam concepções, obrigam o aprendiz a explicitar relações e oferecem oportunidade de revisão. A utilização

de software para construção, e não somente observação, aproxima a atividade de práticas científicas de modelagem.

A quinta convergência é que **simulações digitais apresentam evidência predominantemente favorável à compreensão conceitual**, especialmente quando comparadas a abordagens tradicionais e quando visualizam fenômenos abstratos. A revisão de PhET publicada em 2026 encontrou resultados positivos em grande parte dos estudos incluídos, mas ressaltou heterogeneidade e menor atenção a resultados de ordem superior. Isso impede transformar a conclusão em uma afirmação universal de que “simulações sempre melhoram a aprendizagem”.

A sexta convergência refere-se ao potencial de **realidade aumentada e realidade virtual para espacialidade e engajamento**, acompanhado de uma base de evidência ainda em desenvolvimento. Revisões de 2023 e 2024 documentam expansão rápida dessas tecnologias, mas muitos trabalhos continuam concentrados em percepção, aceitação e testes de curto prazo.

A sétima conclusão é que a visualização pode tanto reduzir quanto aumentar carga cognitiva. Ao externalizar relações espaciais, reduz demanda de imaginação; ao adicionar excesso de movimento, texto, símbolos e controles, aumenta a quantidade de informação simultânea. O desenho precisa ser adaptado à expertise do estudante.

A oitava conclusão é que o **pensamento científico não resulta automaticamente da visualização**. Para desenvolvê-lo, atividades precisam exigir hipótese, previsão, interpretação, comparação de modelos e argumentação. Uma tecnologia utilizada para revelar a

resposta antes que o estudante pense pode, paradoxalmente, reduzir a oportunidade de raciocínio.

A nona conclusão está relacionada à **transferência**. Melhorar desempenho durante a utilização da ferramenta não garante que o conhecimento será empregado em uma situação diferente. Estudos futuros precisam avaliar retenção e capacidade de resolver problemas sem o apoio visual original, e não somente ganhos imediatos no pós-teste.

A décima conclusão é que **aprendizagem significativa exige integração de conhecimentos**. A tecnologia favorece essa integração quando relaciona níveis representacionais e permite revisar modelos prévios. Quando utilizada como elemento decorativo, pode aumentar interesse sem produzir reorganização conceitual.

A décima primeira conclusão refere-se à complementaridade entre laboratório físico e digital. O laboratório oferece contato com fenômenos e práticas materiais; a visualização pode fornecer explicações submicroscópicas e permitir manipulação de sistemas inacessíveis. O desenho mais produtivo frequentemente integra ambos.

A décima segunda conclusão é que a formação docente precisa ser simultaneamente tecnológica e pedagógica. Saber operar o recurso é condição necessária, mas insuficiente. O professor precisa compreender qual dificuldade conceitual está tentando enfrentar e como avaliar se o estudante construiu as relações pretendidas.

A décima terceira conclusão é que equidade tecnológica permanece problema. Simulações baseadas em navegador possuem barreiras

menores que ambientes imersivos, mas acesso desigual a dispositivos e conectividade pode limitar implementação. O planejamento precisa garantir alternativas.

A décima quarta conclusão é que tecnologias visualmente mais sofisticadas não são necessariamente mais eficientes. Uma representação simples e bem integrada pode superar uma experiência imersiva sem estrutura didática. A escolha deve ser feita pela função pedagógica e não pelo impacto visual.

A décima quinta conclusão é que as imagens moleculares precisam ser apresentadas como **modelos**, e não como observações diretas. Desenvolver essa consciência pode contribuir para alfabetização científica, pois ensina como cientistas produzem inferências sobre sistemas invisíveis utilizando modelos teóricos e dados.

9. LIMITAÇÕES DA REVISÃO E LACUNAS DA LITERATURA

A primeira limitação desta revisão decorre da amplitude do conceito de visualização digital. Uma imagem tridimensional estática, uma simulação PhET e um ambiente de realidade virtual não constituem intervenções equivalentes. A síntese conjunta permite identificar princípios gerais, mas não produz uma estimativa única de eficácia.

A segunda limitação corresponde à heterogeneidade dos níveis educacionais. Parte da literatura envolve ensino médio, outra parte estudantes universitários de Química, Bioquímica, Engenharia ou áreas correlatas. Conhecimentos prévios e habilidades espaciais diferem substancialmente, impedindo generalização automática.

A terceira limitação é que muitos estudos utilizam testes imediatamente após a intervenção e avaliam desempenho ou

percepção. Evidências sobre retenção de longo prazo, transferência entre representações e capacidade de utilizar o conhecimento sem a tecnologia são relativamente menos frequentes.

A quarta limitação está no chamado efeito novidade. Recursos imersivos e aumentados podem elevar engajamento porque diferem das atividades habituais, sendo necessário separar motivação inicial de benefício educacional sustentável.

A quinta limitação refere-se à mensuração de aprendizagem significativa. Questionários de satisfação não avaliam integração conceitual, e ganhos em testes de reconhecimento podem não demonstrar transferência. Estudos precisam utilizar instrumentos alinhados ao tipo de aprendizagem reivindicada.

A sexta limitação consiste na desigualdade geográfica da produção científica e das condições tecnológicas. Resultados de instituições com infraestrutura avançada não são diretamente transferíveis para escolas com poucos equipamentos ou conectividade irregular.

Por fim, a presente revisão não executou protocolo PRISMA integral específico e não apresenta números artificiais de identificação e exclusão. A designação **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa** preserva a integridade metodológica e distingue esta produção das revisões sistemáticas auditáveis citadas ao longo do texto.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida permite concluir que a modelagem molecular e a visualização digital possuem elevado potencial para o ensino de Química justamente porque atuam sobre uma das

dificuldades epistemológicas mais características da disciplina: a necessidade de explicar fenômenos observáveis por meio de entidades e processos que não estão diretamente disponíveis aos sentidos. Átomos, moléculas, íons, orbitais, interações intermoleculares e reorganizações eletrônicas precisam ser construídos intelectualmente a partir de modelos, símbolos e evidências, de modo que o estudante não aprende Química apenas adquirindo informações, mas aprendendo uma maneira específica de representar e explicar a matéria. As ferramentas digitais podem tornar esse processo mais acessível ao externalizar estruturas, movimentos e relações espaciais que tradicionalmente dependiam de desenhos estáticos ou imaginação, porém sua contribuição não reside no fato de “mostrar o invisível” como se a tela oferecesse uma janela direta para o mundo molecular. O que ela fornece é uma representação construída, dotada de convenções e limites. A aprendizagem de qualidade exige precisamente que o estudante reconheça essa condição, utilizando o modelo como instrumento explicativo sem confundi-lo com a realidade que procura representar. A competência representacional constitui, portanto, tanto um objetivo quanto uma condição do uso produtivo da tecnologia: quanto maior a capacidade de compreender e transitar entre diferentes formas de representação, maior a possibilidade de utilizar a visualização para produzir raciocínio químico.

A relação entre os níveis macroscópico, submicroscópico e simbólico permanece como um dos principais critérios para avaliar a qualidade de uma intervenção digital. Recursos que apresentam apenas o nível molecular podem tornar determinados conteúdos visualmente mais claros, mas não necessariamente ajudam o estudante a compreender por que aquele modelo importa. Uma visualização de partículas adquire significado químico quando é

relacionada a uma transformação observável e a uma representação simbólica capaz de expressar o fenômeno. Essa articulação permite explicar por que determinadas intervenções que associam experimentação, modelagem e investigação apresentam resultados promissores. O experimento fornece uma evidência a ser explicada; o modelo submicroscópico oferece um mecanismo; e a linguagem simbólica permite representar relações de maneira compacta e quantitativa. O ensino deve tornar explícitas as pontes entre esses domínios, evitando a prática comum de presumir que estudantes farão espontaneamente a tradução. A revisão sistemática de 2024 sobre aprendizagem do nível submicroscópico mostra que atividades eficazes aparecem frequentemente integradas a estratégias investigativas, o que reforça a ideia de que visualização precisa estar inserida em uma sequência cognitiva mais ampla. Não basta ver partículas; é necessário utilizar seu comportamento representado para responder a uma questão química, testar uma explicação e compreender a relação entre aquilo que acontece na escala molecular e aquilo que é observado no laboratório.

A aprendizagem significativa, nessa perspectiva, não pode ser reduzida a aumento de interesse ou facilidade de compreensão momentânea. Uma visualização pode tornar uma aula mais atrativa e ainda produzir conhecimento superficial se o estudante apenas acompanha o que aparece na tela. Para que ocorra integração conceitual, novas representações precisam relacionar-se a conhecimentos prévios e produzir reorganização suficientemente estável para ser utilizada posteriormente. Uma estratégia particularmente coerente consiste em solicitar que estudantes expressem seus modelos antes de acessar a representação digital, seja por desenhos, previsões ou explicações verbais; em seguida, a simulação ou animação fornece evidência para comparação e,

finalmente, o estudante revisa sua explicação. Esse ciclo transforma a tecnologia em instrumento de mudança conceitual. Ele também fornece ao professor informações sobre aquilo que o estudante realmente pensa, evitando confundir silêncio ou reprodução de terminologia com compreensão. A produção e revisão de modelos torna-se, assim, uma forma de tornar visíveis processos cognitivos que normalmente permanecem ocultos e aproxima a atividade escolar da própria dinâmica da Ciência, em que modelos são continuamente confrontados com evidências e modificados quando se mostram insuficientes.

A formação do pensamento científico exige ampliar ainda mais essa lógica e utilizar modelos não somente para representar, mas para explicar e prever. Um estudante desenvolve raciocínio científico quando utiliza uma representação molecular para antecipar uma propriedade, compara sua previsão com observações, identifica discrepâncias e reconstrói a explicação. Simulações interativas são particularmente adequadas a esse tipo de atividade porque permitem alterar variáveis rapidamente e observar padrões, mas a interatividade precisa ser estruturada. Explorar livremente pode ser útil em determinados momentos, porém tentativa e erro sem uma pergunta orientadora raramente produz investigação científica. Sequências baseadas em previsão, manipulação, coleta de evidências, explicação e argumentação tendem a aproveitar melhor as potencialidades desses ambientes. O professor pode ainda introduzir modelos concorrentes ou propositalmente inadequados, solicitando que os estudantes indiquem qual explica melhor um conjunto de dados e quais limitações persistem. Nesse momento, visualização e modelagem deixam de servir exclusivamente à compreensão de conteúdo e passam a ensinar algo sobre a natureza do conhecimento científico: explicações são avaliadas pela

coerência com evidências, modelos são seletivos e diferentes representações podem ser úteis para perguntas diferentes.

As evidências contemporâneas sobre simulações PhET, realidade aumentada e realidade virtual são encorajadoras, mas recomendam prudência diante de discursos tecnológicos deterministas. Revisões publicadas até 2026 encontram resultados predominantemente favoráveis ao desempenho conceitual e ao engajamento, porém também registram heterogeneidade metodológica, amostras relativamente restritas, diferenças de implementação e menor investigação de transferência e retenção. A consequência não deve ser rejeitar as tecnologias, mas abandonar a expectativa de que sua eficácia seja automática. Uma simulação bem integrada pode produzir excelente atividade investigativa em um computador convencional, enquanto uma experiência de realidade virtual de elevado custo pode gerar apenas admiração inicial quando não possui pergunta, orientação ou tarefa intelectual. O princípio pedagógico deve preceder a seleção da tecnologia. Se o objetivo é manipular uma estrutura tridimensional, um aplicativo simples pode ser suficiente; se a finalidade é testar relações entre variáveis, uma simulação interativa pode ser mais apropriada; se a espacialidade e presença constituem dimensões essenciais da experiência, realidade virtual pode acrescentar valor. A inovação precisa ser medida pela qualidade do raciocínio produzido, e não pela sofisticação da interface.

O avanço das tecnologias imersivas também reforça a necessidade de ensinar criticamente as próprias representações. Quanto mais realista é uma molécula digital, maior pode ser a tendência de interpretá-la como reprodução literal. Cores, superfícies, tamanhos atômicos e ligações são escolhas representacionais, e o estudante

precisa compreender por que foram adotadas. Essa educação visual possui grande potencial para fortalecer alfabetização científica porque evidencia que observações científicas são frequentemente mediadas por instrumentos, cálculos e modelos. Um orbital apresentado em três dimensões não foi “fotografado” da maneira como um objeto cotidiano é fotografado; ele resulta de uma representação matematicamente informada. Uma superfície de potencial eletrostático emprega escala cromática criada para tornar diferenças interpretáveis. Discutir essas decisões ajuda a compreender como conhecimento científico é produzido e evita o consumo acrítico de imagens. Em uma sociedade na qual visualizações científicas circulam amplamente em notícias, redes sociais e materiais educacionais, essa competência ultrapassa o ensino de Química e participa de uma alfabetização mais ampla sobre evidências e representações.

A mediação docente permanece, portanto, insubstituível. A expansão de recursos digitais não reduz a importância do professor; aumenta a necessidade de alguém capaz de selecionar, contextualizar e problematizar representações. O docente precisa reconhecer concepções alternativas, antecipar dificuldades espaciais, escolher o nível de complexidade apropriado e formular perguntas que obriguem o estudante a estabelecer relações. Formação tecnológica centrada apenas no funcionamento do aplicativo é insuficiente. O profissional precisa saber por que utilizar aquele recurso, qual conceito pretende tornar acessível, quais interpretações equivocadas podem surgir e como avaliar se a aprendizagem ocorreu. As próprias revisões de PhET, realidade aumentada e ambientes virtuais identificam mediação e formação como fatores recorrentes da efetividade. Instituições que investem em plataformas sem investir em desenvolvimento profissional

podem terminar com recursos subutilizados ou utilizados apenas para substituir slides estáticos por animações igualmente transmissivas.

A avaliação precisa acompanhar essa transformação metodológica. Se o estudante participa de atividades de modelagem, mas posteriormente é avaliado apenas pela reprodução de fórmulas e algoritmos, a instituição desvaloriza justamente o raciocínio que pretendia desenvolver. Instrumentos avaliativos podem solicitar que o estudante interprete uma representação inédita, traduza entre níveis, construa um modelo, justifique uma previsão ou identifique limitações de uma visualização. Tarefas desse tipo são mais exigentes, mas produzem evidência mais direta sobre compreensão conceitual e competência representacional. Também permitem investigar transferência, uma das lacunas importantes da literatura. O objetivo de uma intervenção não deve ser que o estudante resolva corretamente apenas a tarefa apresentada pelo software, mas que consiga aplicar os princípios em novas situações e, quando apropriado, sem o apoio externo. O uso de representações digitais deve funcionar como andaime para o desenvolvimento do pensamento, e não como prótese da qual o estudante se torna permanentemente dependente.

A integração entre laboratórios físicos e digitais oferece outra direção particularmente promissora. Simulações e modelos computacionais conseguem representar escalas e processos que não são observáveis no laboratório, enquanto atividades experimentais fornecem contato com materialidade, incerteza e práticas de manipulação que ambientes virtuais não reproduzem integralmente. Em vez de disputar qual modalidade deve substituir a outra, o ensino pode utilizar suas complementaridades. Antes do experimento, uma

simulação pode ajudar a formular previsões e compreender variáveis; durante ou depois, uma visualização molecular pode explicar os resultados; posteriormente, o estudante pode comparar a evidência real com o modelo digital e discutir discrepâncias. Essa sequência fortalece a ligação entre observação e teoria e reduz o risco de o laboratório tornar-se apenas execução de roteiro ou de o ambiente virtual transformar-se em experiência descolada da realidade física.

A equidade e a acessibilidade também precisam integrar as decisões pedagógicas. Recursos digitais de baixo custo e baseados em navegador podem democratizar acesso a visualizações sofisticadas, mas escolas e estudantes continuam enfrentando desigualdades de equipamentos, conectividade e suporte técnico. Realidade virtual e dispositivos avançados ampliam ainda mais essas diferenças. Estratégias educacionais devem prever alternativas e evitar que o acesso à forma mais sofisticada de tecnologia se transforme em condição para aprender determinado conceito. A acessibilidade envolve ainda estudantes com diferentes perfis sensoriais, motores e cognitivos, para os quais determinadas interfaces tridimensionais podem representar benefício ou obstáculo. A inovação mais coerente é aquela capaz de ampliar oportunidades de compreensão sem produzir exclusões adicionais.

Conclui-se, portanto, que a modelagem molecular e a visualização digital constituem estratégias valiosas para o ensino de Química quando são utilizadas como instrumentos de construção de explicações, e não como substitutos do pensamento. Sua principal contribuição está em permitir que estudantes trabalhem explicitamente com entidades e processos submicroscópicos, relacionando-os a fenômenos macroscópicos e linguagens

simbólicas, desenvolvendo gradualmente competência para interpretar e produzir modelos. Simulações, animações, realidade aumentada e realidade virtual ampliam as possibilidades de interação e investigação, mas nenhum desses recursos possui eficácia independente de seu desenho didático. O caminho mais consistente é organizar atividades em que o estudante formule previsões, manipule representações, confronte resultados, explique evidências e revise modelos, transformando a visualização em componente de uma prática científica escolar. Sob essas condições, a tecnologia pode contribuir não apenas para tornar conteúdos abstratos mais visíveis, mas para construir uma compreensão mais integrada da Química, promover aprendizagem significativa e formar estudantes capazes de pensar com modelos, questionar representações e utilizar evidências para explicar o mundo material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHITTLEBOROUGH, Gail; TREAGUST, David F. The modelling ability of non-major chemistry students and their understanding of the sub-microscopic level. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 8, n. 3, p. 274-292, 2007. DOI: 10.1039/B6RP90035F.

COOPER, Melanie M.; STOWE, Ryan L. Chemistry Education Research —From personal empiricism to evidence, theory, and informed practice. *Chemical Reviews*, v. 118, n. 12, p. 6053-6087, 2018. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00020.

GILBERT, John K.; REINER, Miriam; NAKHLEH, Mary (ed.). *Visualization: Theory and Practice in Science Education*. Dordrecht: Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-5267-5.

GILBERT, John K.; TREAGUST, David F. (ed.). *Multiple Representations in Chemical Education*. Dordrecht: Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-1-4020-8872-8.

GROVE, Nathaniel P.; BRETZ, Stacey Lowery. A continuum of learning: from rote memorization to meaningful learning in organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 13, p. 201-208, 2012. DOI: 10.1039/C1RP90069B.

GURULOO, Thelugu Novah Mary; OSMAN, Kamisah. Integrating Virtual Reality Laboratories (VRLs) in Chemistry Education: a systematic literature review. *International Journal of Education*, v. 15, n. 4, p. 127-147, 2023. DOI: 10.5296/ije.v15i4.21372.

JOHNSTONE, Alex H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, v. 7, n. 2, p. 75-83, 1991. DOI: 10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x.

LAOHAPORNCHAIPHAN, Jutitorn; CHENPRAKHON, Pirom. A review of research on learning activities addressing the submicroscopic level in chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 101, n. 11, p. 4552-4565, 2024. DOI: 10.1021/acs.jchemed.4c00156.

MAZZUCO, Alex; KRASSMANN, Aliane Loureiro; REATEGUI, Eliseo; GOMES, Raquel Salcedo. Augmented Reality in the teaching and learning process of Chemistry: a systematic literature review. *Revista Debates em Ensino de Química*, v. 9, n. 1, 2023. DOI: 10.53003/redequim.v9i1.4844.

NGUYEN, Mau Duc; NGUYEN, Vinh Quang. Application of Augmented Reality in Chemistry Education: a systemic review based on bibliometric analysis from 2002 to 2023. *International Journal of*

Education in Mathematics, Science and Technology, v. 12, n. 6, p. 1415-1434, 2024.

NINGRUM, Sinta Ayu; ROHMAN, Ijang; GUMILAR, Gun Gun; MUDZAKIR, Ahmad; HANA, Muhammad Nurul; NAIS, Miarti Khikmatun. Effectiveness of PhET simulations on learning outcomes in science and chemistry education: a systematic review. *Multimodal Technologies and Interaction*, v. 10, n. 7, art. 69, 2026. DOI: 10.3390/mti10070069.

RIBIČ, Luka; DEVETAK, Iztok. Augmented reality in developing students' understanding of chemistry triplet: a systematic literature review. *Chemistry Teacher International*, v. 7, n. 1, 2025. DOI: 10.1515/cti-2024-0060.

SCARAMUSSA, Dalila Sartori; SANTOS, Julia Jacone; ERTHAL, João Paulo Casaro; SOUZA, Luceli de. PhET e o ensino de Química: uma revisão integrativa de literatura. *Revista da Sociedade Brasileira de Ensino de Química*, v. 7, e072603, 2026. DOI: 10.56117/resbenq.2026.v7.e072603.

SCHRÖDER, Laurens; et al. Features of immersive virtual reality to support meaningful chemistry education. *Journal of Chemical Education*, v. 100, n. 4, p. 1537-1546, 2023. DOI: 10.1021/acs.jchemed.2c01069.

SUITS, Jerry P.; SANGER, Michael J. Dynamic visualizations in chemistry courses. In: SUITS, Jerry P.; SANGER, Michael J. (ed.). *Pedagogic Roles of Animations and Simulations in Chemistry Courses*. Washington, DC: American Chemical Society, 2013. p. 1-13. DOI: 10.1021/bk-2013-1142.ch001.

TALANQUER, Vicente. Chemistry education: ten heuristics to tame. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 8, p. 1091-1097, 2014. DOI: 10.1021/ed4008765.

TREAGUST, David F.; CHITTLEBOROUGH, Gail; MAMIALA, Thapelo L. The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, v. 25, n. 11, p. 1353-1368, 2003. DOI: 10.1080/0950069032000070306.

WILLIAMSON, Vickie M.; ABRAHAM, Michael R. The effects of computer animation on the particulate mental models of college chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 32, n. 5, p. 521-534, 1995. DOI: 10.1002/tea.3660320508.

¹ Mestrado em Química (UFRPE); Especialização em Ensino de Química (UCAM/Prominas); Licenciatura em Química (UFPE). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4450-5858>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1463741843751569>.

² Licenciatura em Química, Universidade Federal do Maranhão; Doutorado em Ciências e Tecnologia de Polímeros, Universidade Federal do Rio de Janeiro. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

³ Pós-graduação em Ensino de Ciências, Faculdade Iguaçu; Licenciatura em Química, UEMA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁴ Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia (BioNorte), UFMA; Mestrado em Química, UFMA; Especialista em Análises Clínicas, FIJ;

Bacharel em Farmácia, UFMA; Licenciado em Química, Unicive;
Licenciado em Ciências Biológicas, Unicive. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6436-9777>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4840836120979074>.

⁵ Mestrado Profissional em Gestão e Serviço em Saúde na Amazônia;
Graduação em Licenciatura Plena em Ciências Naturais - Química,
Universidade do Estado do Pará (UEPA); Graduação em Letras -
Língua Portuguesa, Universidade Federal do Pará. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8624-6404>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5539189179365799>.

⁶ Especialização em Práticas Assertivas em Educação Profissional
Integrada à Educação de Jovens e Adultos - EJA, Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN);
Licenciatura em Química, IFAM-CMC. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7811-7945>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6643545208765968>.

⁷ Pós-graduação em Traumatologia Desportiva, Docência e
Neurologia; Fisioterapeuta; Centro Universitário da Amazônia -
Uniesamaz.

⁸ Doutor e Mestre em Ciências e Meio Ambiente, Universidade
Federal do Pará - UFPA; Matemático e Pedagogo. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).