



Artigo

ANÁLISE DE PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS DE QUÍMICA A PARTIR DE MÉTRICAS VERDES

Thaysa Ayres de Miranda Rodrigues

Júlia Damazio Bouzon

Juliana Barreto Brandão

Suyane David Sá de Alvarenga

Alvaro Chrispino

Resumo

Este trabalho apresenta a avaliação da verduza química de experimentos de um livro didático de química, como parte de uma monografia apresentada a um Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química. A análise baseou-se na construção das métricas holísticas matriz verde e estrela verde, que possibilitam avaliar o cumprimento dos princípios da Química Verde a partir dos protocolos experimentais. Como recorte de pesquisa, selecionaram-se apenas as atividades que não envolveram síntese e apresentaram o máximo de dados necessários à sua realização, totalizando cinco protocolos. Foram identificadas lacunas que permitiram apontar possíveis melhorias dos experimentos quanto ao uso de substâncias e condições reacionais mais seguras, a fim de que favorecesse seus esverdeamentos.

Palavras-Chave: química verde, métricas holísticas, experimentação.

Introdução

Os grandes movimentos ambientalistas do último século demonstraram que a excessiva produção de resíduos e poluição por parte das fábricas representava grande perigo ao meio ambiente e à vida humana. Se por um lado, o desenvolvimento industrial resultou em aumento na qualidade de vida, por outro, produziu uma cadeia de impactos ambientais e prejuízos à sustentabilidade do planeta: crescimento desordenado, esgotamento do solo, escassez de água, poluição (atmosférica, hídrica, eletromagnética etc.), efeito estufa, entre outros danos.

O primeiro indicativo de atenção à problemática ambiental ocorreu em 1949 com a realização da Conferência Científica da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre a Conservação e Utilização de Recursos e, desde então, diversos outros eventos e conferências buscaram avaliar os impactos do comportamento humano sobre a natureza. Dentre estes, destacamos dois marcos quanto à perspectiva sobre a relação “homem-ambiente”: a criação da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987, que apresentou o documento *Nosso Futuro Comum* (Relatório de *Brundtland*) e trouxe ao discurso público, pela primeira vez, a ideia de desenvolvimento sustentável (DS); e o início da Conferência das Partes (COP), que vem se repetindo anualmente, desde 1995, para avaliar o progresso nas ações de mitigação das mudanças climáticas a partir da redução das emissões de gases estufa, haja vista o *Protocolo de Kyoto* (1997).

A construção de um modelo de desenvolvimento sustentável – capaz de suprir as necessidades da geração atual sem esgotar os recursos para o futuro (ONU, 1987) – vem sendo difundida há tempos, embora esse conceito seja constantemente criticado (Kruse; Cunha, 2022; Roloff, 2016; Boff, 2012).

De acordo com Boff (2012), sustentabilidade significa:

o conjunto dos processos e ações que se destinam a manter a vitalidade e a integridade da mãe Terra, a preservação de seus ecossistemas com todos os elementos físicos, químicos e ecológicos que possibilitam a existência e a reprodução da vida, o atendimento das necessidades da presente e das futuras gerações, e a continuidade, a expansão e a realização das potencialidades da civilização humana em suas várias expressões (Boff, 2012, p.14).

Enquanto o “desenvolvimento é um processo de crescimento e evolução que, no contexto socioeconômico, pressupõe a utilização dos recursos da Terra” (Brandão, 2022, p.15). Para Kruse e Cunha (2022, p.9), “o que é certo é que não existe desenvolvimento sem crescimento, eis que, desenvolver envolve conjuntamente o crescer economicamente”. Neste sentido, percebe-se um contrassenso no que se denomina Desenvolvimento Sustentável, visto que o equilíbrio proposto por esse conceito não é possível dentro do nosso sistema econômico.

Tendo isso em vista, destaca-se o papel da Educação para a construção de uma visão crítica sobre o assunto. Durante os anos de 2005 a 2014, as Nações Unidas firmaram, como instrumento de mobilização, a Década das Nações Unidas da Educação para o Desenvolvimento Sustentável (Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura, 2005), e visava contribuir com a sustentabilidade, a partir de competências para que todos sejam alfabetizados cientificamente, aprendendo a participar ativamente das questões relacionadas à ciência e tecnologia.

Desta forma, as tentativas de minimizar os impactos ambientais causados pelos processos de industrialização, que visam o desenvolvimento e bem-estar da sociedade, têm sido cada vez mais desafiadoras.

Assim, para evitar que o colapso ambiental e possível fim da humanidade se tornem realidade, é necessário empenhar uma série de esforços e mobilizações capazes de colocar em prática o que se discute nos grandes fóruns governamentais e científicos (Boff, 2011; Boff, 2012). Fazem-se necessárias, portanto, entre outras medidas, investir em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais limpas, implementar políticas públicas de controle e prevenção da poluição e, fundamentalmente, privilegiar uma formação escolar que desperte para os principais desafios contemporâneos (Borreda; Vilches, 2016).

No ímpeto de tentar alcançar este último esforço, muitas instituições de ensino de química vêm incorporando, gradativamente, novas abordagens em seus currículos a fim de contribuir com uma produção científica e tecnológica ambientalmente mais benigna. Dentre elas está a Química Verde (QV), um campo de estudo baseado em doze princípios (Anastas; Warner, 1998), que emergiu, na década de 90, como uma resposta à pressão sofrida pelas indústrias acerca da necessidade de repensar seus modelos de produção, e de implementarem ações capazes de reduzir os danos causados ao meio ambiente através da concepção de produtos e processos químicos mais seguros e menos poluentes (Mestres, 2013; Marcelino; Marques; Sjöström, 2019; Marques *et al.*, 2020).

Tais princípios revelam como a QV prioriza ações preventivas quanto à poluição e à segurança no processo industrial, compreendendo, intrinsecamente, a exigência de que os impactos de um produto ao ambiente sejam avaliados desde a sua concepção – criação e *design* – até o destino dado ao material após seu consumo, com o intuito de assegurar o uso racional dos recursos naturais, privilegiar o uso e a geração de substâncias inócuas e maximizar a redução dos riscos – físicos, químicos e biológicos.

São eles: 1 – prevenção; 2 – economia de átomos; 3 – síntese de produtos menos perigosos; 4 – desenho de produtos seguros; 5 – solventes e outras substâncias auxiliares mais seguras; 6 – busca pela eficiência energética; 7 – uso de fontes renováveis de matéria prima; 8 – evitar a formação de derivados; 9 – catálise; 10 – desenho para a degradação; 11 – análise em tempo real para a prevenção da poluição; 12 – química inerentemente mais segura quanto à prevenção de acidentes (Lenardão *et al.*, 2003).

Para Machado (2014), o cumprimento dos princípios resulta no esverdeamento do processo industrial, isto é, no aumento de sua *verdura química*. Assim, quanto maior o número de princípios atendidos, maior a *verdura química* da cadeia produtiva, o que torna a indústria química mais sustentável em suas atividades.

Embora sua origem reporte à indústria, a QV pode ser estendida à educação básica de nível médio, tal como já vem ocorrendo nas instituições de ensino superior. De acordo com Souza, Silva e Costa (2020, p. 599) o ensino de química possibilita, entre outras competências, “[...] a avaliação de potencialidades, limites e riscos do uso de diferentes materiais e/ou tecnologias, tal como preconiza o primeiro princípio da QV, relacionado à prevenção”.

Além disso, de acordo com Sjöström, Rauch e Eilks (2015, p. 164, tradução nossa), é essencial “que os estudantes adquiram conhecimentos substanciais de química no contexto de questões sociocientíficas e de sustentabilidade, a fim de entender os desenvolvimentos,

alternativas e dilemas subjacentes”. Porém, os autores alertam que o conhecimento científico por si só não será suficiente para isso. É importante que os discentes aprendam ao longo de suas trajetórias acadêmicas como as questões relacionadas à química, à indústria e ao meio ambiente funcionam dentro do debate social, para que consigam desenvolver habilidades e participem dos processos de tomada de decisão (Sjöström, Rauch e Eilks, 2015).

Apoiado nesta mesma perspectiva, este artigo reflete sobre o potencial formativo da QV no sentido de uma educação voltada à sustentabilidade. Para tanto, discutimos a relevância em integrar os saberes curriculares da química aos princípios da QV atentando-se à importância da experimentação no contexto da educação básica de nível médio.

Autores como Grünfeld de Luca, Aparecida dos Santos, Del Pino e Câmara Pizzato (2018), Catelan e Rinaldi (2018), Passos, Vasconcelos e Silveira (2022), enfatizam que a prática de atividades experimentais no ensino de ciências e, propriamente, de química, é potencialmente capaz de promover diferentes habilidades no indivíduo, sobretudo, quando conduzidas de maneira investigativa, contextualizada e interdisciplinar. Contudo, destacamos que é necessário que a experimentação seja também ambientalmente responsável e, por isto, buscamos propor uma reflexão sobre o grau de verdura química dos experimentos de um livro didático, considerando a preocupação com a segurança química, o descarte e o tratamento de resíduos, seguida da construção das métricas holísticas matriz verde e estrela verde.

Métricas holísticas: Matriz verde e Estrela verde

Métricas são grandezas que analisam a extensão com que um processo ou síntese se aproxima (ou afasta) do cumprimento dos princípios da QV. Existem diferentes tipos de métricas: métricas ambientais (compreendem vários princípios), de massa (relativas aos P1 e P2), de energia (P6), de segurança (P12) e holísticas (todos os doze princípios), sendo estas as mais adequadas para a inserção da QV no ensino, pois, além de compreender todos os princípios, apresentam maior simplicidade na avaliação de experimentos quanto ao grau de verdura química (Ribeiro; Machado, 2013; Machado, 2015; Marques; Machado, 2018). Neste trabalho, como critério de análise, optou-se pelas métricas holísticas Matriz Verde (MV) e Estrela Verde (EV), descritas por Machado (2014).

A matriz verde tem por base uma análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), que em português pode ser traduzida como análise FOFA (Força, Oportunidades, Fraquezas, Ameaças). O principal objetivo do método é mapear os pontos fortes e fracos (variáveis internas), as oportunidades e ameaças (variáveis externas) relacionadas a uma metodologia química (Mendes, 2018), de forma a embasar ações capazes de impactar positivamente seu grau de verdura.

A estrela verde, por sua vez, é uma métrica de natureza gráfica que permite identificar visualmente os aspectos que levam ao cumprimento parcial ou total dos princípios da QV. O número de pontas da EV indica a quantidade de princípios avaliados e o preenchimento de cada ponta é proporcional ao grau de cumprimento do princípio correspondente. Para tanto,

é preciso detalhar as condições experimentais, bem como as quantidades das substâncias reagentes, os riscos (físicos, químicos e biológicos), a degradabilidade e a renovabilidade de todas as substâncias envolvidas (Sandri; Gomes; Bolzan, 2018).

Para que a análise das métricas possa fornecer dados que contribuam para a revisão e otimização do protocolo em estudo, empregam-se apenas os princípios da QV que são aplicáveis ao procedimento. No ensino de química, para experimentos que envolvem reações de síntese, não são aplicados os princípios P4 e P11, uma vez que não se costuma realizar o desenho de novos produtos (Ribeiro; Machado, 2013). Na ausência de síntese, são considerados apenas os princípios P1, P5, P6, P7, P10 e P12, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios para avaliação do cumprimento dos princípios da QV

Princípio	Critério
P1. Prevenção	Não se formam resíduos ou quando se formam têm riscos baixos para a saúde e para o ambiente
P5. Solventes e auxiliares mais seguros	Não se utilizam solventes nem outras substâncias auxiliares ou quando se utilizam têm riscos baixos para a saúde e para o ambiente
P6. Busca pela eficiência de energia	Pressão e temperatura ambientes
P7. Uso de fonte renováveis de matéria-prima	Todos os reagentes/matérias-primas envolvidos são renováveis
P10. Desenho para a degradação	Todas as substâncias envolvidas são degradáveis em produtos de degradação inócuos

Fonte: Ribeiro e Machado, 2013. Adaptado.

As informações sobre os riscos associados aos princípios estão descritas no Quadro 2 e podem ser encontradas na Ficha de Dados de Segurança (FDS) de cada substância, através de símbolos, pictogramas e frases que alertam para os perigos dos produtos químicos. Enquanto a análise da matriz verde considera a classificação desses riscos, a construção da EV utiliza a pontuação correspondente.

Quadro 2 – Riscos associados a análise da verdura química dos experimentos

Risco	Indicação de risco	Pontuação (EV)	Classificação (MV)
Riscos das substâncias envolvidas			
Saúde	Corrosivo; Tóxico; Muito tóxico	3	Elevado
	Prejudicial; Irritante	2	Moderado
	Nenhuma indicação	1	Baixo
Ambiente	Perigoso para o ambiente	3	Elevado
	Nenhuma indicação	1	Baixo
Riscos de acidente químico			
Saúde	Corrosivo; Tóxico; Muito tóxico	3	Elevado
	Prejudicial; Irritante	2	Moderado
	Nenhuma indicação	1	Baixo
Inflamabilidade	Muito inflamável; Extremamente inflamável	3	Elevado
	Nenhuma indicação	1	Baixo
Reatividade	Explosivo; Agente oxidante	3	Elevado
	Nenhuma indicação	1	Baixo
Degradabilidade e renovabilidade			
Degradabilidade	Não degradáveis ou que não possam ser tratados gerando produtos inócuos	3	Não se aplica
	Possam ser tratados para se obter a sua degradação	2	
	Degradáveis a produtos inócuos	1	
Renovabilidade	Não renováveis	3	
	Renováveis	1	

Fonte: Machado, 2014. Adaptado.

Em relação à MV, os pontos fortes correspondem aos aspectos positivos que permitem que os princípios da QV sejam cumpridos, enquanto os fracos representam os aspectos que impedem os seus cumprimentos, conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Critérios para análise da verduza química de experimentos

Princípio	Critério de Análise	Pontos Fortes	Pontos Fracos
P1	1. Riscos físicos	Uso de reagentes sem indicação de risco físico	Uso de reagentes com indicação de risco físico
	2. Riscos à saúde	Uso de reagentes sem indicação de risco à saúde	Uso de reagentes com indicação de risco à saúde
	3. Riscos ao ambiente	Uso de reagentes sem indicação de risco ao ambiente	Uso de reagentes com indicação de risco ao ambiente
	4. Geração de resíduos	Não há geração de resíduos ou estes são inócuos	Há geração de resíduos
P5	5. Consumo de solventes e auxiliares além dos reagentes iniciais	Não se faz necessário o uso de solventes e auxiliares ou estes são inócuos	Os solventes e/ou os auxiliares representam perigo à saúde ou ambiente
	6. Consumo de água como solvente ou reagente	Consumo baixo ($V \leq 50$ mL)	Consumo alto ($V > 50$ mL)
	7. Consumo de água em resfriamentos ou banhos	Consumo baixo ($V \leq 200$ mL)	Consumo alto ($V > 200$ mL)
	8. Consumo de outros solventes além da água	Consumo baixo ($V \leq 50$ mL)	Consumo alto ($V > 50$ mL)
P6	9. Consumo de energia	Pressão e temperatura ambientes	Pressão ou temperatura diferentes da do ambiente
P7	10. Utilização de substâncias renováveis	Utiliza-se	Não se utiliza
	11. Utilização de substâncias que podem ser reutilizadas em outras experiências ou recicladas após o uso	Utiliza-se	Não se utiliza
P10	12. Uso de reagentes degradáveis a produtos inócuos (exceto água)	Os reagentes em uso são degradáveis	Pelo menos um dos reagentes não é degradável ou gera substância nociva em sua decomposição
P12	13. Riscos de acidentes devido aos reagentes envolvidos	Uso de reagentes sem indicação de	Uso de reagentes com indicação de risco físico

		risco físico e/ou à saúde	e/ou a saúde
	14. Risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos (centrífuga, estufa, mantas; evaporador rotativo, bomba de vácuo e banho termostatizado)	Riscos baixos ou moderados	Riscos elevados
	15. Risco de acidentes devido ao uso de outros materiais vulgares	Riscos baixos ou moderados (vidrarias, termômetros, etc.)	Riscos elevados (gás, bicos de Bunsen etc.)
Demais critérios analisados			
Uso de materiais alternativos	16. Emprego de materiais do cotidiano (exceto água)	Utiliza-se	Não se utiliza
Contextualização	17. Favorece a contextualização entre o experimento e as situações da vida cotidiana, a tecnologia, a sociedade ou ambiente	Favorece	Não favorece

Fonte: Sandri e Santin Filho, 2017. Adaptado.

Na análise externa, as oportunidades indicam os fatores que podem ser melhorados e as ameaças reúnem os obstáculos que dificultam o alcance dos objetivos (Quadro 4). Os resultados dessa análise possibilitam refletir sobre melhorias que podem ser implementadas no processo ou na reação para torná-los mais verdes. Atuando sobre os pontos fortes e explorando as oportunidades é possível eliminar ou reduzir os pontos fracos e as ameaças identificadas.

Quadro 4 – Dimensões externas da análise SWOT aplicada à matriz verde

Oportunidades	Ameaças
Substituir ou eliminar substâncias com riscos moderados/elevados por outras com riscos baixos; Eliminar o uso de solventes e auxiliares ou substituí-los por substâncias com riscos baixos; Otimizar o processo para aumentar a economia de átomos (proporções estequiométricas ou próximas); Otimizar o processo para	Dificuldades em atender os aspectos mencionados nas oportunidades por razões econômicas ou pela inexistência de alternativas conhecidas para os processos em uso.

redução do consumo de energia (pressão e temperatura ambientes);
 Usar reagentes catalíticos com riscos baixos ao invés de reagentes estequiométricos;
 Não usar derivatizações;
 Substituir substâncias não degradáveis por substâncias degradáveis a produtos inócuos;
 Substituir substâncias não renováveis por substâncias renováveis.

Fonte: Machado, 2014.

Para a métrica da estrela verde, de acordo com critérios pré-estabelecidos no Quadro 2, aponta-se o cumprimento dos princípios, de um a três (Quadro 5): ausência total de verdura (1); moderadamente verde (2) e plenamente verde (3) (Machado, 2014). O grau de verdura química do experimento é evidenciado através da coloração da estrela: uma EV totalmente preenchida de verde representa a situação ideal na qual todos os princípios são plenamente atendidos, enquanto uma EV totalmente preenchida de vermelho demonstra que nenhum princípio foi atendido e uma EV preenchida com as duas cores indica a situação em que os princípios foram parcialmente atendidos.

De acordo com Ribeiro, Costa e Machado (2010), quando necessária, a comparação entre diferentes práticas pode ser facilitada pelo Índice de Preenchimento da Estrela (IPE), cálculo que determina a percentagem de área verde da estrela relativa à área de um gráfico de verdura máxima. Em caso de verdura máxima o IPE é igual a 100%, enquanto para a de mínima, o IPE é 0%.

Quadros 5 – Componentes e pontuações dos princípios

Princípios	Pontuação (p)	Critérios
P1 – Prevenção	3	Todos os resíduos são inócuos (p=1)
	2	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo moderado para a saúde e ambiente (p=2, sem nenhum que envolva p=3)
	1	Formação de pelo menos um resíduo que envolva perigo elevado para a saúde e ambiente (p=3)
P5 – Solventes e outras substâncias	3	Os solventes e as substâncias auxiliares não existem ou são inócuas (p=1)
	2	Os solventes e as substâncias auxiliares usadas envolvem perigo moderado para a saúde e ambiente (p=2, pelo menos para uma

auxiliares mais seguras		substância, sem substâncias com p=3)
	1	Pelo menos um dos solventes ou uma das substâncias auxiliares usadas envolve perigo elevado para a saúde e ambiente (p=3)
P6 – Busca pela eficiência energética	3	Temperatura e pressão ambientais
	2	Pressão ambiental e temperatura entre 0°C e 100°C que implique arrefecimento ou aquecimento
	1	Pressão diferente da ambiental e/ou temperatura > 100 °C ou menor do que 0 °C
P7 – Uso de fontes renováveis de matéria prima	3	Todos os reagentes/matérias-primas envolvidos são renováveis (p=1)
	2	Pelo menos um dos reagentes/matérias-primas envolvidos é renovável, não se considera a água (p=1)
	1	Nenhum dos reagentes/matérias-primas envolvidos é renovável, não se considera a água (p=3)
P10 – Desenho para a degradação	3	Todas as substâncias envolvidas são degradáveis com os produtos de degradação inócuos (p=1)
	2	Todas as substâncias envolvidas que não são degradáveis podem ser tratadas para obter a sua degradação com os produtos de degradação inócuos (p=2)
	1	Pelo menos uma das substâncias envolvidas não é degradável nem pode ser tratada para obter a sua degradação com produtos de degradação inócuos (p=3)
P12 – Química inerentemente e mais segura quanto à prevenção de acidentes	3	As substâncias envolvidas apresentam perigo baixo de acidente químico (p=1, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)
	2	As substâncias envolvidas apresentam perigo moderado de acidente químico (p=2, pelo menos para uma substância, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos, e sem substâncias com p=3)
	1	As substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico (p=3, considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)

Fonte: Educa, 2023. Adaptado.

De maneira geral, todas estas metodologias favorecem a visualização dos aspectos que podem ser melhorados em um processo ou síntese para que se alcance maior verduza química. A partir dos resultados de uma análise é possível propor alterações nas condições reacionais buscando o esverdeamento do procedimento, de modo que, ao final, em outra avaliação, ele passe a atender um maior número de princípios.

Assim, o objetivo desta pesquisa consistiu na análise do grau de verdura química de experimentos propostos por um livro didático de química, por meio da construção das métricas holísticas matriz verde e estrela verde, buscando, sempre que possível, apontar possíveis melhorias e adequações com o intuito de construir conhecimentos sobre sustentabilidade e Química Verde. Em outras palavras, o que se pretende é proporcionar uma reflexão quanto à possibilidade de incorporar os conceitos da QV na educação básica de nível médio a partir da preocupação com a verdura das atividades práticas experimentais realizadas, ressaltando a importância da prevenção e da redução máxima dos riscos.

Abordagem metodológica

A presente pesquisa foi parte de uma monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Química de um colégio da rede federal do Rio de Janeiro, tendo em vista a análise do grau de verdura química de experimentos propostos por um livro didático de química¹ a partir da construção das métricas holísticas matriz verde e estrela verde. O material foi selecionado, pois atende ao público da primeira série do ensino médio da referida instituição.

Após a análise dos dez experimentos descritos no livro, foi feito um recorte de pesquisa considerando aqueles que não envolveram síntese química e que apresentaram o máximo de informações necessárias para a sua realização, o que possibilitou selecionar cinco experimentos cujos protocolos estão descritos a seguir.

- *Experimento 1: Densidade e correntes de convecção:* A primeira atividade experimental investiga como a variação de temperatura e do grau de salinidade pode afetar a densidade da água e influir na formação das correntes de convecção tal como ocorre nos lagos e mares. O efeito se torna visível a partir da comparação de dois sistemas: gelo colorido (preparado com corante alimentício) e água "pura"; gelo colorido e solução saturada de cloreto de sódio (sal de cozinha).

- *Experimento 2: Eletrólitos e não-eletrólitos:* Esta atividade estuda como se dá a diferença na condução de corrente elétrica para sólidos iônicos (sal de cozinha) e moleculares (açúcar) e suas respectivas soluções aquosas. Para isto, são descritas as instruções para a montagem da aparelhagem necessária: uma placa com luz de LED com dois eletrodos de fios rígidos conectados simultaneamente a uma bateria de 9V e ao material em análise.

- *Experimento 3: Bolhas mais resistentes:* Esta atividade relaciona a formação de bolhas de sabão mais resistentes ao aumento das ligações de hidrogênio, através da adição de xarope de milho a uma mistura de água e detergente.

- *Experimento 4: Indicadores ácido-base:* Este experimento trabalha o uso de indicadores naturais para determinar o caráter ácido, básico ou neutro de diferentes produtos (desinfetante com amoníaco, bicarbonato de sódio, refrigerante, vinagre, cal) a partir da coloração

¹ Livro "Química I", de autoria da professora Martha Reis. REIS, M. **Química I**. 1ª edição. São Paulo: Editora Ática, 2013.

apresentada pelas suas respectivas soluções. Os indicadores de interesse são: extrato de solução aquosa de repolho roxo, extrato alcoólico de beterraba e extrato alcoólico de hibisco.

- *Experimento 5: Polaridade e solubilidade:* Este experimento tem como objetivo estabelecer a relação entre a polaridade e a solubilidade de uma substância e explicar a ação dos emulsificantes a partir da adição de detergente a duas misturas imiscíveis: água e óleo; água e gordura proveniente do leite.

Visto que o livro didático não possui atividades de síntese, esta pesquisa restringiu sua avaliação de verdura química para a construção das métricas, aos princípios P1, P5, P6, P7, P10 e P12, dispondo de dezessete itens de análise desdobrados por Sandri e Santin Filho (2017), conforme informado no Quadro 3.

Para a construção das matrizes verdes, foram pesquisadas informações referentes às substâncias indicadas nos protocolos dos experimentos, de acordo com as suas FDSs. Em seguida, analisaram-se as demais variáveis envolvidas nos processos a fim de identificar os possíveis riscos atrelados a cada prática. A partir desses dados levantados, foram confeccionadas as matrizes verdes, que apontaram os pontos fortes e fracos, além das oportunidades e ameaças.

A fim de complementar a análise da verdura química dos experimentos, foram construídos dois conjuntos de estrelas verdes: (i) decorrente dos protocolos indicados no livro; (ii) procedente das oportunidades fornecidas nas matrizes verdes. Todas as informações coletadas foram inseridas em planilhas disponibilizadas na plataforma "Educa" (2023) que geraram de forma automática os gráficos das estrelas.

Resultados e discussão

Após a apreciação dos roteiros e a confecção das matrizes e estrelas verdes, compararam-se os resultados obtidos em ambas as métricas, que estão ilustrados a seguir.

O primeiro experimento atende plenamente aos critérios indicados como pontos fortes no Quadro 6. Entretanto, os critérios que não são completamente atendidos estão listados como pontos fracos. A partir do protocolo experimental do livro didático, percebe-se a possibilidade de modificação do experimento a fim de atender as oportunidades listadas na matriz, cumprindo os critérios 9 e 10. Para o estudo da densidade, pode-se substituir o gelo por outro material que seja possível analisar a temperatura ambiente, assim como o corante alimentício artificial pode ser substituído por um natural, ou até mesmo não ser utilizado.

Quadro 6 – Matriz verde do experimento 1: Densidade e Correntes de Convecção

Pontos Fortes	Pontos Fracos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Reagentes sem indicação de risco físico; 2. Reagentes sem indicação de risco à saúde; 3. Reagentes sem indicação de risco ao ambiente; 4. Não há geração de resíduos ou estes são inócuos; 5. Dispensa o uso de solventes e auxiliares ou estes são inócuos; 7. Consumo baixo de água em resfriamentos ou banhos; 8. Não há consumo de outros solventes além da água; 11. Utiliza substâncias que podem ser reutilizadas ou recicladas após o uso; 12. Pelo menos um dos reagentes não é degradável ou gera substância nociva em sua decomposição. 13. Reagentes sem indicação de risco físico e/ou à saúde; 14. Não há risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos; 15. Materiais de riscos baixos ou moderados; 16. Utiliza materiais do cotidiano; 17. Favorece a contextualização. 	<ol style="list-style-type: none"> 6. Alto consumo de água; 9. Pressão ou temperatura diferente da do ambiente; 10. Nem todas as substâncias são renováveis (corante alimentício).
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> - Diminuir a quantidade de água utilizada como solvente; - Reduzir o consumo de energia optando por procedimentos em condições ambientes; - Substituir substâncias não renováveis (corante artificial) por substâncias renováveis e degradáveis à produtos inócuos (corante natural). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade de reduzir o consumo de água ao volume total de 50 mL; - Dificuldade de reduzir o consumo de energia, pois poderia afetar a compreensão do experimento.

Fonte: Autoria própria.

A partir do protocolo experimental do livro didático, percebe-se a possibilidade de modificação do experimento a fim de atender as oportunidades listadas na matriz, especialmente no que se refere ao critério 10. Embora a utilização de gelo esteja relacionada ao cumprimento do critério 9, sua retirada pode comprometer a compreensão do fenômeno estudado, sendo importante ponderar os efeitos dessa alteração. Já em relação ao corante alimentício, observa-se que o roteiro não especifica sua origem, que pode ser sintética ou natural. Dessa forma, destaca-se a importância de optar por corantes naturais, como o de beterraba ou o de cúrcuma, que são exemplos de substâncias de origem renovável amplamente disponíveis.

Em relação ao experimento 2, observa-se um alto número de critérios atendidos (Quadro 7).

Quadro 7 – Matriz verde do experimento 2: Eletrólitos e não-eletrólitos

Pontos Fortes	Pontos Fracos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Reagentes sem indicação de risco físico; 2. Reagentes sem indicação de risco à saúde; 3. Reagentes sem indicação de risco ao ambiente; 4. Não há geração de resíduos ou estes são inócuos; 5. Dispensa o uso de solventes e auxiliares ou estes são inócuos; 7. Não há consumo de água em resfriamentos ou banhos; 8. Não há consumo de outros solventes além da água; 9. Pressão e temperatura ambientes; 11. Utiliza substâncias que podem ser reutilizadas ou recicladas após o uso; 12. Todos os reagentes usados são degradáveis; 13. Reagentes sem indicação de risco físico e/ou à saúde; 14. Não há risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos; 15. Materiais de riscos baixos ou moderados; 16. Utiliza materiais do cotidiano; 17. Favorece a contextualização. 	<ol style="list-style-type: none"> 6. Alto consumo de água; 10. Nem todas as substâncias são renováveis (sal de cozinha, NaCl).
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> - Diminuir a quantidade de água como solvente; - Substituição dos reagentes não renováveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade em reduzir o consumo de água ao volume total de 50 mL; - Inviabilidade de substituição de parte dos reagentes (sal de cozinha, NaCl).

Fonte: Autoria própria.

Entretanto, como o protocolo prevê a comparação entre a condutividade de substâncias iônicas e moleculares, tanto no estado sólido quanto em solução aquosa, a substituição de alguns materiais por alternativas renováveis torna-se inviável sem comprometer os objetivos conceituais da prática. Nesse sentido, embora o sal de cozinha (NaCl) seja de origem mineral e, portanto, não renovável, sua permanência no experimento é justificada pela acessibilidade, baixo custo e presença no cotidiano dos alunos. Em contrapartida, o açúcar (sacarose), utilizado como composto molecular não eletrolítico, pode ser considerado de origem renovável, quando proveniente de fontes vegetais como a cana-de-açúcar ou a beterraba.

Além disso, destaca-se que, embora o volume total de água utilizado (200 mL) configure um ponto fraco na matriz verde (critério 6), a redução desse volume poderia prejudicar a visualização dos resultados e a compreensão do fenômeno em questão. Assim, deve-se ponderar que, apesar do volume ser superior a 50 mL, ele não representa, isoladamente,

um fator de grande impacto ambiental no contexto escolar, especialmente se forem adotadas práticas de reuso ou descarte adequado da solução ao final da atividade.

Os pontos fracos referentes aos critérios 6 e 10 também foram observados no experimento 3, conforme o Quadro 8, entretanto, neste caso, é possível atender parcialmente as oportunidades sem prejudicar o roteiro experimental, uma vez que elas não caracterizam ameaças.

Quadro 8 – Matriz verde do experimento 3: Bolhas mais resistentes

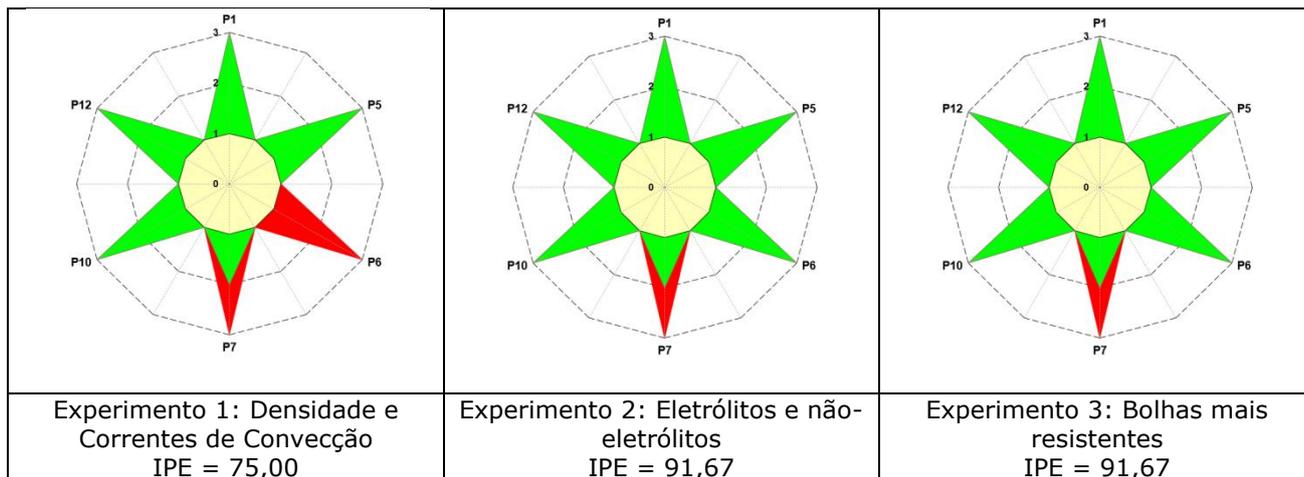
Pontos Fortes	Pontos Fracos
1. Reagentes sem indicação de risco físico; 2. Reagentes sem indicação de risco à saúde; 3. Reagentes sem indicação de risco ao ambiente; 4. Não há geração de resíduos ou estes são inócuos; 5. Dispensa o uso de solventes e auxiliares ou estes são inócuos; 7. Não há consumo de água em resfriamentos ou banhos; 8. Não há consumo de outros solventes além da água; 9. Pressão e temperatura ambientes; 12. Todos os reagentes usados são degradáveis; 13. Riscos de acidentes devido aos reagentes envolvidos (saúde). 14. Não há risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos; 15. Materiais de riscos baixos ou moderados; 16. Utiliza materiais do cotidiano;	6. Alto consumo de água; 10. Nem todas as substâncias são renováveis (detergente).
Oportunidades	Ameaças
- Diminuir a quantidade de água como solvente; - Substituir o reagente não renovável.	- Diminuir a resistência das bolhas de sabão.

Fonte: Autoria própria.

No experimento voltado à formação de bolhas mais resistentes, é possível considerar a redução do volume total da mistura, uma vez que o próprio roteiro sugere a preparação conforme o tamanho do recipiente e a quantidade desejada, desde que se respeite a proporção 1:1:½ entre água, detergente e xarope de milho. A diminuição dos volumes de água e de detergente, portanto, pode contribuir para uma prática mais sustentável, sem comprometer a eficácia do experimento. Além disso, a substituição do detergente (de origem petroquímica) por um sabão de fonte renovável pode ser considerada uma alternativa mais alinhada com os princípios da Química Verde.

Tendo em vista que a matriz verde não contempla o cumprimento parcial de critérios como ponto forte, optou-se pela construção das estrelas verdes a fim de complementar a análise. Dessa forma, pode-se observar que os três experimentos analisados apresentaram alto consumo de água, além da utilização de substâncias não renováveis, enquanto pontos fracos semelhantes da matriz verde. Apesar disso, as estrelas verdes dos três experimentos são distintas entre si (Figura 1), pois o cumprimento dos princípios varia de acordo com o procedimento experimental.

Figura 1 – Estrelas verdes dos experimentos 1 (Densidade e Correntes de Convecção), 2 (Eletrólitos e não-eletrólitos) e 3 (Bolhas mais resistentes)



Fonte: Autoria própria.

É interessante observar que o P5, nas estrelas referentes aos três experimentos, apresenta grau de esverdeamento total, mesmo sendo um princípio que, na MV, julga o critério seis (alto consumo de água) como um ponto fraco. Isso acontece porque na metodologia da EV esse princípio leva em conta os perigos dos solventes e substâncias auxiliares referentes à saúde e ao ambiente, enquanto na MV pondera-se além da necessidade do uso, a sua respectiva quantidade.

Dessa forma, apesar de os experimentos trabalharem com grande quantidade de substâncias, o que caracteriza um ponto fraco para MV, elas não apresentam riscos à saúde e ao ambiente, o que ilustra a maior área verde possível na estrela para esse princípio.

Além desses princípios, o P7 possui o nível intermediário de verdura, mesmo julgando o critério 10 da MV como ponto fraco. Isso acontece porque a MV não pondera se pelo menos uma das substâncias utilizadas é renovável, ou seja, caso uma delas seja não renovável, o critério já é considerado como uma fraqueza.

As estrelas verdes confeccionadas após as mudanças propostas nas oportunidades apresentaram grau de esverdeamento máximo (IPE = 100,00). No entanto, é importante ressaltar que algumas dessas modificações podem comprometer a compreensão dos fenômenos ocorridos nas práticas, como é o caso da execução do experimento 1 sem aquecimento. Dessa forma, é necessário que se pondere as vantagens e desvantagens de cada protocolo e se suas mudanças são viáveis, a fim de obter maior grau de verdura química sem implicar em prejuízos pedagógicos.

É importante destacar que a construção das métricas holísticas dos protocolos experimentais permite discutir sobre a dimensão ambiental, uma vez que contempla a minimização da geração de resíduos e substituição de substâncias tóxicas e/ou não renováveis por outras menos perigosas e/ou renováveis. Essa proposta possibilita aos estudantes refletirem sobre os impactos ambientais e sociais dos experimentos realizados nas aulas de química, fomentando um olhar holístico sobre a prática.

Além disso, ao priorizar roteiros com substâncias de baixo custo torna-se viável a sua reprodutibilidade em ambiente escolar, que pode ser mais carente de infraestrutura para obter reagentes mais caros.

Em relação ao experimento sobre indicadores ácido-base pode-se observar, no Quadro 9, que atende apenas quatro critérios. Isso ocorre devido aos riscos inerentes ao uso do desinfetante com amoníaco e cal, bem como o alto consumo de solventes, temperatura elevada e risco de acidente químico devido à utilização de álcool etílico.

Quadro 9 – Matriz verde do experimento 4: Indicadores ácido-base

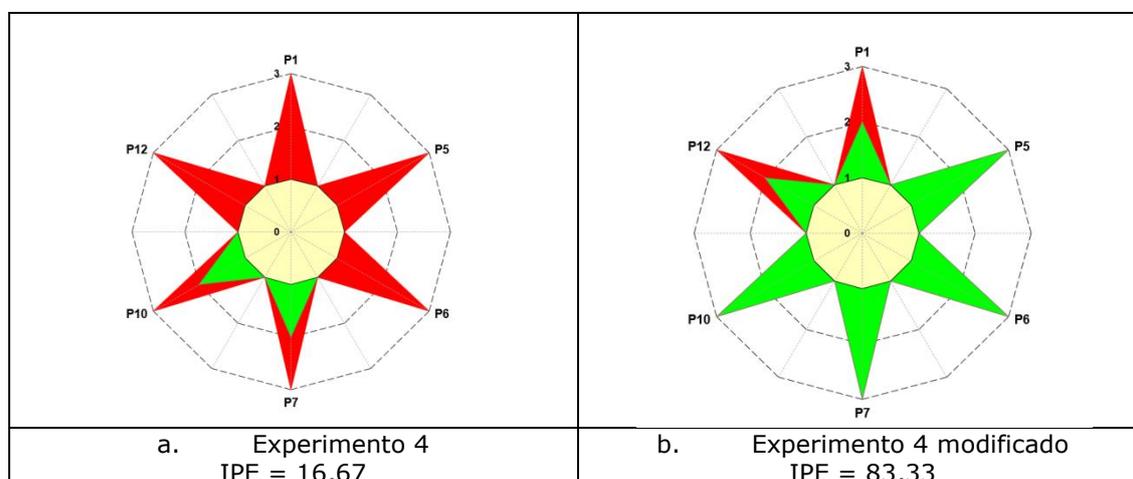
Pontos Fortes	Pontos Fracos
<p>7. Não há consumo de água em resfriamentos ou banhos;</p> <p>14. Não há risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos (manta, bomba de vácuo etc.);</p> <p>16. Utiliza materiais do cotidiano;</p> <p>17. Favorece a contextualização.</p>	<p>1. Reagentes com indicação de risco físico (álcool etílico 92,8 °GL, cal, desinfetante com amoníaco);</p> <p>2. Reagentes com indicação de risco à saúde (álcool etílico 92,8 °GL, cal, desinfetante com amoníaco);</p> <p>3. Reagentes com indicação de risco ao ambiente (álcool etílico 92,8 °GL, cal, desinfetante com amoníaco);</p> <p>4. Há geração de resíduos;</p> <p>5. Os solventes e/ou os auxiliares representam perigo à saúde ou ambiente (álcool etílico 92,8°GL);</p> <p>6. Alto consumo de água;</p> <p>8. Alto consumo de outros solventes além da água (álcool etílico 92,8°GL);</p> <p>9. Pressão ou temperatura diferente da do ambiente;</p> <p>10. Nem todas as substâncias são renováveis;</p> <p>11. Não utiliza substâncias que podem ser reutilizadas ou recicladas após o uso;</p> <p>12. Nem todos os reagentes usados são degradáveis;</p> <p>13. Reagentes com indicação de risco físico e/ou à saúde;</p> <p>15. Riscos elevados de acidente devido ao uso de equipamentos vulgares (fogão).</p>

Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> - Substituir ou eliminar substâncias com indicação de riscos físico, à saúde e/ou ao ambiente por substâncias que ofereçam menor ou nenhum risco; - Eliminar o uso de álcool etílico 92,8 °GL como solvente; - Diminuir a quantidade de água como solvente; - Reduzir o consumo de energia optando por procedimentos em condições ambientes; - Não utilizar equipamentos ou materiais que representam riscos elevados de acidentes ou substituir por outros com riscos mais baixos (placas ou mantas de aquecimento ao invés de um fogão a gás, por exemplo). 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificuldade em reduzir o consumo de água e substituir o álcool como solvente, porque pode afetar o preparo do extrato dos indicadores.

Fonte: Autoria própria.

Por isso, observa-se na estrela verde (Figura 2a) que os princípios 1, 5, 6 e 12 não foram cumpridos em sua totalidade. Entretanto, os princípios 7 e 10 apresentam algum grau de verdura, visto que essa métrica contempla o uso de pelo menos uma substância renovável (beterraba e hibisco), além da possibilidade de tratamento do reagente não degradável.

Figura 2 – Estrelas verdes do experimento 4: Indicadores ácido-base



Fonte: Autoria própria.

Ao avaliar as oportunidades apresentadas na MV, percebeu-se que a mudança de alguns fatores pode melhorar a verdura química da estrela, como indica a Figura 2b. Dessa forma, caso haja a substituição do vinagre por suco de limão e da cal por hidróxido de magnésio, os princípios 1 e 12 terão cumprimento parcial, e o 10 total. Além disso, a área de verdura do princípio 5 aumentará se empregar apenas a água como solvente, assim como P7 será esverdeado completamente se o experimento for realizado a temperatura ambiente. Isso porque o extrato de repolho roxo pode ser obtido de forma mais simples, batendo-se as

folhas com água em um liquidificador e, em seguida, filtrando a mistura. Não é necessário aquecimento, pois essa etapa não interfere no resultado quanto à mudança de cor.

Por fim, a análise do protocolo da prática cinco (Quadro 10) indicou a presença de pontos fortes, como o uso de substâncias de origem renovável e com potencial de reaproveitamento (óleo de cozinha). No entanto, também foram identificadas limitações, especialmente no que se refere ao critério 10, marcado como ponto fraco devido à presença de corante alimentício e detergente, cuja origem pode ser sintética, o que compromete seu caráter renovável.

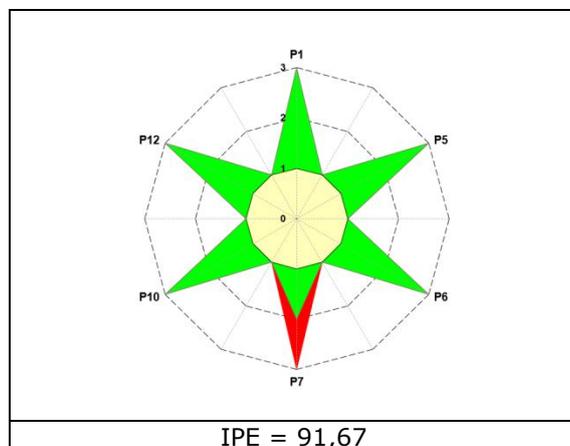
Quadro 10 – Matriz verde do experimento 5: Polaridade e solubilidade

Pontos Fortes	Pontos Fracos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Reagente sem indicação de risco físico; 2. Reagentes sem indicação de risco à saúde; 3. Reagentes sem indicação de risco ao ambiente; 4. Não há geração de resíduos que representam perigo à saúde ou ambiente. 5. Dispensa o uso de solventes e auxiliares ou estes são inócuos; 6. Baixo consumo de água. 7. Não há consumo de água em resfriamentos ou banhos; 8. Não há consumo de outros solventes além da água; 9. Pressão e temperatura ambientes; 11. Utiliza substâncias que podem ser reutilizadas ou recicladas após o uso; 12. Todos os reagentes usados são degradáveis; 14. Não há risco de acidentes devido ao uso de certos equipamentos (manta, bomba de vácuo etc.); 13. Substâncias sem indicação de risco físico e/ou à saúde; 15. Materiais de riscos baixos ou moderados; 16. Utiliza materiais do cotidiano; 17. Favorece a contextualização. 	<ol style="list-style-type: none"> 10. Nem todas as substâncias são renováveis (detergente).
Oportunidades	Ameaças
<p>- Substituir os reagentes não renováveis.</p>	<p>- Não há.</p>

Fonte: Autoria própria.

Ao comparar a MV com a EV (Figura 3), observa-se que o princípio 7 encontra-se parcialmente preenchido, uma vez que a métrica da matriz não considera como ponto forte a presença de pelo menos uma substância renovável (critério 10).

Figura 3 – Estrela verde do experimento 5: Polaridade e solubilidade



Fonte: Autoria própria.

Neste caso, a substituição do corante sintético por outro natural, bem como a troca do detergente por sabão, promoveria IPE máximo para a estrela verde.

Desta forma, percebe-se que o uso das diferentes métricas é importante para suscitar discussões acerca dos impactos causados na prática dos experimentos nos laboratórios de ensino, levando os discentes a refletir sobre esses impactos em âmbito industrial. Nesse sentido, além da análise a respeito da dimensão ambiental, é fundamental que seja levada em consideração a viabilidade econômica, por exemplo, ao se propor alterações nos protocolos experimentais.

A substituição por substâncias ambientalmente mais adequadas deve ser analisada, porque para realizar práticas experimentais sustentáveis, é essencial considerar não apenas o impacto ambiental da substância utilizada, mas também a real necessidade de seu uso e o custo total envolvido na atividade. Sugerir reagentes de maior custo pode inviabilizar a execução do experimento em determinados contextos escolares, especialmente em instituições públicas com recursos limitados. Nesses casos, deve-se avaliar se a substituição compromete ou não a dimensão econômica da sustentabilidade. Assim como essas alterações podem comprometer a análise do experimento em laboratório, também podem inviabilizar economicamente os sistemas de produção industrial.

Ademais, a realização desses experimentos nas aulas de química sob o viés da QV possibilita construir conhecimentos que servem como base para a conscientização e educação ambiental.

Considerações finais

A análise do grau de verdura química dos experimentos buscou avaliar as práticas disseminadas em um livro didático de química com base nos princípios da QV e na construção das métricas holísticas matriz e estrelas verdes. Os resultados indicam o cuidado dos protocolos

em priorizar materiais de fácil acesso e, ao mesmo tempo, favorecer a aproximação dos roteiros ao cotidiano dos estudantes, conferindo maior significado às atividades.

Por um lado, ainda que estejam presentes informações sobre medidas de segurança e descarte adequado dos resíduos, foi percebida a necessidade de alguns ajustes pontuais como, por exemplo: a substituição de substâncias com potencial de risco físico, à saúde e/ou ao ambiente por outras de menor ou nenhum risco; a redução do consumo de água e a adequação dos procedimentos para que sejam realizados a temperatura ambiente.

A preocupação com a verduza química dos experimentos no livro didático reporta diretamente aos princípios da QV e a importância da prevenção, uma vez que é preferível evitar o uso e a formação de compostos indesejados do que ter que lidar com os riscos que eles envolvem. Isso está em consonância com os ideais do desenvolvimento sustentável, visto que a implementação de ações ambientalmente corretas na escola pode contribuir para a formação de indivíduos mais comprometidos com o uso racional dos recursos naturais.

Embora Anastas e Warner (1998) tenham elaborado os doze princípios tendo em vista, inicialmente, os processos industriais, é crescente a compreensão de que eles devam participar da formação acadêmica, desde o ensino básico ao superior, de forma gradual e acessível.

Quanto a isto, as métricas se destacam e possibilitam a discussão para alcançar a sustentabilidade ambiental dos processos químicos. Nesse sentido, tanto a Matriz Verde quanto a Estrela Verde se mostraram ferramentas importantes de visualização dos aspectos que podem ser melhorados nos experimentos para o ensino médio, refletindo a possibilidade de implementação no ensino de química.

Finalmente, é importante ressaltar que as métricas apresentam limitações, como não considerar alterações parciais em alguns critérios, além dos problemas de interpretação que são inerentes aos roteiros experimentais. Apesar disso, é inegável que se caracterizam como uma ferramenta fundamental para discutir entre professores e com os estudantes a importância dessas análises, a fim de construir conhecimentos acerca da sustentabilidade ambiental, e formar indivíduos mais críticos e participativos nos processos que envolvem questões sociocientíficas.

Referências

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green Chemistry**: theory and practice. Oxford: University Press, 1998.

BOFF, L. Sustentabilidade e cuidado: um caminho a seguir. **leonardoboff.org**, 2011. Disponível em: <https://leonardoboff.org/2011/06/16/sustentabilidade-e-cuidado-um-caminho-a-seguir/>. Acesso em 31 out 2021.

BOFF, L. **Sustentabilidade: O que é – O que não é**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2012.

BORREDA, L.M.; VILCHES, A. Química Verde y Sostenibilidad em la educación en ciencias em secundaria. **Enseñanza de Las Ciencias**, v. 34, n. 2, p. 25-42, 2016.

BRANDÃO, J.B. **Ensino de Química Verde no Ensino Médio e Técnico com enfoque na Experimentação e Abordagem CTS**. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Educação) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Cefet/RJ, Rio de Janeiro, 189 f., 2022.

CATELAN, S. S.; RINALDI, C. A atividade experimental no ensino de ciências naturais: contribuições e contrapontos. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 13, n. 1, p. 306-320, 2018.

EDUCA. **Cultura científica e ensino/aprendizagem da química**. Disponível em: <<http://educa.fc.up.pt/>>. Acesso em 20 de janeiro de 2023.

GRÜNFELD DE LUCA, A.; APARECIDA DOS SANTOS, S.; DEL PINO, J.; CÂMARA PIZZATO, M. Experimentação contextualizada e interdisciplinar: uma proposta para o ensino de ciências. **Revista Insignare Scientia - RIS**, v. 1, n. 2, 22 ago. 2018.

KRUSE, B. C.; CUNHA, L. A. G. Reflexões críticas acerca do desenvolvimento (in)sustentável. **Revista IDEAS**, Rio de Janeiro, v. 16, p.1-24, e022002, 2022.

LENARDÃO, E. J.; FREITAG, R. A.; DABDOUB, M. J.; BATISTA, A. C. F.; SILVEIRA, C. C. "Green Chemistry" – Os 12 princípios da Química Verde, e sua inserção nas atividades de ensino e pesquisa. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 123-129, 2003.

MACHADO, A. A. S. C. (2015). Holistic Green Chemistry metrics for use in teaching laboratories, In: V. Zuin, V. G. and Mammino, L. (org). *Worldwide Trends in Green Chemistry*, (pp. 27-44). England: RSC.

MACHADO, A. A. S. C. **Introdução às métricas de química verde**: uma visão sistêmica. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2014.

MARCELINO, L. SJÖSTRÖM, J.; MARQUES, C. A. Socio-problematization of green chemistry: enriching systems thinking and social sustainability by education. **Sustainability**, v. 11, n. 7123, p. 1-16, 2019.

MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. Una visión sobre propuestas de enseñanza de la química verde. **Revista Electrónica de Enseñanza de Las Ciencias**, v. 17, n. 1, p. 19-43, 2018.

MARQUES, C. A.; MARCELINO, L.V.; DIAS, E.D.S; RUNTZEL, P.L.; SOUZA, L. C. A. B.; MACHADO, A. Green chemistry teaching for sustainability in papers published by the journal of chemical education. **Química Nova**, v. 43, n. 10, p. 1510-1521, 2020.

MENDES, M. **Experimentos de química geral na perspectiva da química verde**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018.

MESTRES, R. Química Sostenible: Naturaleza, fines y ámbito. **Educación química**, v. 24, p. 103-112, 2013.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Our Common Future**, 1987. Disponível em: <https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>. Acesso em 25 jul. 2022.

PASSOS, B.; VASCONCELOS, A. K.; SILVEIRA, F. Ensino de Química e Aprendizagem Significativa: uma proposta de Sequência Didática utilizando materiais alternativos em atividades experimentais. **Revista Insignare Scientia - RIS**, v. 5, n. 1, p. 610-630, 16 mar. 2022.

RIBEIRO, M. G. T. C.; COSTA, D. A.; MACHADO, A. A. S. C. Uma métrica gráfica para avaliação de reações laboratoriais – “Estrela Verde”. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 759-764, 2010.

RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Holistic metrics for assessment of the greenness of chemical reactions in the context of chemical education. **Journal of Chemical Education**, Washington, v. 90, p. 432-439, 2013.

ROLOFF, F.B. **A Circulação de Conhecimentos em Química Verde em Teses e Dissertações: implicações ao seu ensino e à Formação de Professores de Química**. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 346 f., 2016.

SANDRI, M. C. M.; SANTIN FILHO, O. Análise da verduza química de experimentos propostos para o ensino médio. **ACTIO: Docência em Ciências**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 99-118, 2017.

SANDRI, M. C. M.; GOMES, S. I. A. A.; BOLZAN, J. A. **Química Orgânica experimental. Aplicação de métricas holísticas de verduza: estrela verde e matriz verde**. Curitiba: Editora IFPR, 2018. Disponível em: <https://reitoria.ifpr.edu.br/wp-content/uploads/2018/12/EBOOK-QUIMICA-ORG%C3%82NICA-EBOOK-19-12-4.pdf>. Acesso em 16 out. 2021.

SJÖSTRÖM, J., RAUCH, F., EILKS, I. Chemistry Education For Sustainability. In: Eilks, I., Hofstein, A. (eds) **Relevant Chemistry Education: from Theory to Practice**. SensePublishers, Rotterdam, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-6300-175-5_9

SOUZA, A. C.; SILVA, C. E.; COSTA, T. T. A abordagem dos princípios da Química Verde e sustentabilidade no livro didático de química do ensino médio. **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, Espanha, v. 19, n. 3, p. 593-616, 2020.

Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura. **Década da Educação das Nações Unidas para um Desenvolvimento Sustentável, 2005-2014: documento final do esquema internacional de implementação**. Brasília: UNESCO, 2005.

Sobre os autores

THAYSA AYRES DE MIRANDA RODRIGUES

Graduada em Licenciatura em Química pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFRJ), com Especialização em Ensino de Química pelo Colégio Pedro II. Atualmente é mestranda, na modalidade mestrado profissional na área de Química da UFRJ. Professora da rede privada de ensino.

E-mail: thaysaayres@gmail.com / thaysaayres@ufrj.br

JÚLIA DAMAZIO BOUZON

Professora EBTT do Colégio Pedro II e professora adjunta de Química Geral e Inorgânica da UERJ. Doutora em Ciência, Tecnologia e Educação pelo CEFET/RJ (2022). Mestre em Ensino de Ciências pela UFF (2015). Graduada em Licenciatura em Química pela UERJ (2012).

E-mail: juliabouzon@gmail.com

JULIANA BARRETO BRANDÃO

Graduada em Licenciatura em Química pela Universidade Federal Fluminense (2007), mestre em Ensino de Ciências pela Universidade Federal Fluminense (2015) e doutora em Ciência, Tecnologia e Educação pelo CEFET/RJ (2022). Atualmente é professora efetiva do CEFET/RJ.

E-mail: juliana.brandao@cefet-rj.br

SUYANE DAVID SÁ DE ALVARENGA

Biografia: Bacharel em Química com Atribuições Tecnológicas pelo Instituto de Química da UFRJ. Mestre e Doutora em Ciências pelo programa de Pós-Graduação em Química do Instituto de Química da UFRJ, com ênfase na área de fotoquímica e petróleo. Atualmente é professora do quadro permanente do CEFET/RJ, campus Maracanã.

E-mail: suyane.alvarenga@cefet-rj.br

ALVARO CHRISPINO

Biografia: Doutor (2001) e Mestre em Educação (1992) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Possui Pós-doutorado em Administração Pública pela FGV/EBAPE. Professor Titular (CEFET/RJ), atuando na pós-graduação desde 2003. Participa de projetos de pesquisa internacionais e lidera grupo de pesquisa/CNPq CTS e Educação.

E-mail: alvaro.chrispino@cefet-rj.br

Analysis of experimental chemistry protocols using green metrics

Abstract

This paper presents the greenness evaluation of experiments in a chemistry textbook. This is part of a monograph presented to a Chemistry Teaching Post-Graduate Program. The analysis used the construction of the holistic metrics: green matrix and green star. These make it possible to assess the experimental protocols based on the principles of green chemistry compliance. This research selected just experiments that did not involve synthesis and presented the necessary data for their performance. It resulted five protocols. Gaps were identified and they allowed indicate possible improvements in the experiments as the use of safer substances and reaction conditions in order to favor their greenness.

Keywords: green chemistry, holistic metrics, experimentation.

Análisis de protocolos experimentales de química a partir de métricas verdes

Resumen

Este artículo presenta la evaluación del verdor químico de experimentos en un libro de texto de química, como parte de una monografía presentada a un Programa de Posgrado en Enseñanza de Química. El análisis se basó en la construcción de las métricas holísticas “matriz verde” y “estrella verde”, que permiten evaluar el cumplimiento de los principios de la Química Verde a partir de protocolos experimentales. Como parte de la investigación, fueron seleccionadas solamente las actividades que no implicaban síntesis y presentaban la máxima cantidad de datos necesarios para su realización, totalizando cinco protocolos. Se identificaron vacíos que permitieron señalar posibles mejoras en los experimentos en cuanto al uso de sustancias y condiciones de reacción más seguras, con el fin de favorecer su “verdeamiento”.

Palabras clave: química verde, métricas holísticas, experimentación.