

A questão da (in)sustentabilidade na Química Verde: potenciais controvérsias para Educação em Ciências

The (un)sustainability issue in Green Chemistry: potential controversies for Science Education

Júlio César Lemos Milli

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
juliocesarmilli@gmail.com

Érica Dayane Souza Dias

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
ericadqi@gmail.com

Leonardo Victor Marcelino

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
leovmarcelino@gmail.com

Patricia Link Rüntzel

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
patriciaruntzel@gmail.com

Carlos Alberto Marques

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
carlos.marques@ufsc.br

Resumo

A Química Verde (QV) tem se desenvolvido como alternativa para minorar e prevenir o uso e geração de substâncias perigosas, almejando ser um caminho para a sustentabilidade. Entretanto, essas relações não são consensuais ou claras, sugerindo a existência de controvérsias, aspectos que este ensaio teórico busca explorar, discutindo implicações desses elementos para o ensino de Química/Ciências. Internamente, há químicos que discordam sobre o papel socioambiental da QV (reduzir custos, compromisso ético-ambiental ou inovação) ou mesmo se ela cria novos conhecimentos. Externamente, tenta equilibrar viabilidade e crescimento econômico com eficácia na proteção ambiental, mas por vezes negligencia os limites impostos pela Lei da Entropia. Tais discussões no ensino de Química/Ciências permitem vislumbrar a dinâmica conflituosa e não neutra da prática científica e tecnológica, bem como desmistificar os mitos da superioridade das decisões tecnocráticas, principalmente ao se analisar a QV de forma sistêmica.

Palavras chave: Química Verde, controvérsias, CTS, sustentabilidade, entropia.

Abstract

Green Chemistry (GC) has developed as an alternative to reduce and prevent the use and generation of hazardous substances, aiming to be a path to sustainability. However, these relations are not consensual or clear, suggesting the existence of controversies, aspects that this theoretical essay seeks to explore, discussing the implications of these elements for the teaching of Chemistry/Sciences. Internally, there are chemists who disagree about the socio-environmental role of GC (reducing costs, ethical-environmental commitment or innovation) or even if it creates new knowledge. Externally, it tries to balance economic growth and viability with effectiveness in environmental protection, but sometimes it neglects the limits imposed by the Entropy Law. Such discussions in the teaching of Chemistry/Sciences allow us to glimpse the conflicting and non-neutral dynamics of scientific and technological practice, as well as to demystify the myths of the superiority of technocratic decisions, especially when analyzing GC in a systemic way.

Key words: Green Chemistry, controversies, STS, sustainability, entropy.

Introdução

Alguns trabalhos apresentam discussões envolvendo o desenvolvimento de alternativas para processos ou sínteses químicas menos poluentes e benignas, numa perspectiva mais sustentável, tanto em pesquisas em Educação em Ciências, mas em particular no ensino de química. Alguns destes trabalhos, inclusive, se pautam na chamada Química Verde (QV) (ZANDONAI et al., 2014; ROLOFF, 2016).

A QV, com gênese em meados de 1980-90, é um campo de pesquisas e práticas crescentes que pode ser resumida como “A invenção, desenvolvimento e aplicação de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas” (TUNDO, 2000, tradução nossa). Por essa razão, a QV se apresenta como uma alternativa ao desafio da sustentabilidade (EILKS; SJÖSTRÖM; ZUIN, 2017), ainda que sejam poucas as evidências de que esse potencial tenha sido explorado em discussões acadêmicas, no âmbito industrial (MARQUES; MACHADO, 2014; MATLIN et al., 2015; EILKS; ZUIN, 2018), ou mesmo de que haja consenso entre os diversos setores da química sobre o papel da QV (HOWARD-GRENVILLE et al., 2017). Assim, a função social da Química (Verde) continua pouco clara, conforme já apontou Schummer (1997), pois deixa pouco evidente ou mesmo dá pouca atenção às suas relações com o meio social e ambiental, isto é, com todo o mundo que a rodeia. Assim, parece haver controvérsias ou campos de incerteza dentro da QV que não estão sendo abordadas ampla e explicitamente pela maioria dos seus pesquisadores.

De acordo com Reis (2009), as controvérsias têm uma dimensão interna, constituindo o campo de disputas necessário à produção do conhecimento da ciência e tecnologia, uma dimensão mais epistemológica. Por outro lado, Reis (2009) ressalta que essas controvérsias, e os conhecimentos que geram, têm uma dimensão externa, ao produzirem divergências entre as comunidades científicas e a própria sociedade e, por isso, são denominadas de controvérsias sociocientíficas. Pedagogicamente, Martínez e Parga (2013) destacam a abordagem de questões sociocientíficas (QSS) como um meio de efetivar as interações entre Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente (CTSA) no contexto educativo, promovendo análise de suas controvérsias, posicionamento crítico e tomada de decisões. Todavia, Sousa e Gehlen (2017) apresentam a falta de consenso sobre a função pedagógica e processo de seleção das QSS nas pesquisas brasileiras.

Assim, selecionamos a QV como objeto de estudo, considerando a crise ambiental atual e as
Educação CTS/CTSA e Alfabetização Científica e Tecnológica

possibilidades da mesma para alcançar a sustentabilidade. Nossa hipótese é que a QV apresenta controvérsias internas e externas, e que a explicitação das controvérsias pode propiciar o debate e um melhor entendimento sobre a natureza da ciência/química, seu papel social, processos de tomada de decisão e relações CTS em geral. Portanto, essa pesquisa investiga a possível existência de controvérsias internas e externas à QV e, a partir disso, discute implicações para o seu ensino.

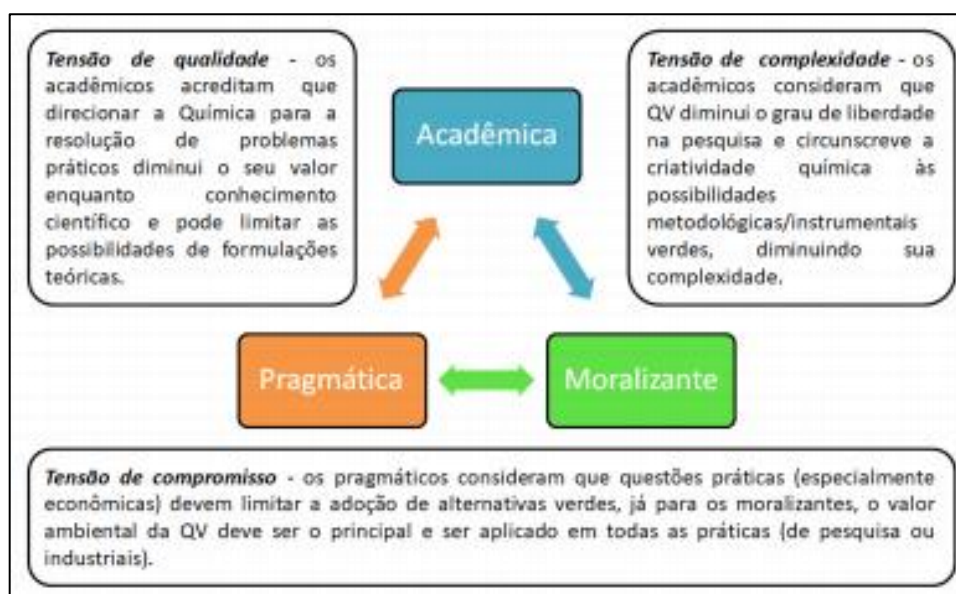
Metodologicamente, esse estudo foi orientado com base em alguns aspectos da Análise Textual Discursiva, especialmente em sua etapa de categorização que, de acordo com Moraes (2003), consiste na busca por relações a partir da fragmentação e (re)organização de elementos textuais que se assemelham a fim de sustentar a elaboração de um determinado argumento e contribuir para novas compreensões. Assim, foi definido um conjunto de trabalhos da literatura da QV com base em pesquisas prévias que elencam autores e trabalhos relevantes do campo a partir de estudos bibliométricos (MARCELINO; PINTO; MARQUES, 2020a, 2020b).

A análise foi orientada pelas características das controvérsias definidas por Reis (2009), controvérsias internas e externas à ciência, apresentadas nas seções **Controvérsias científicas internas à Química Verde; Controvérsias sociocientíficas e socioambientais a partir da Química Verde;** e o **Potencial das controvérsias no ensino da Química Verde.**

Controvérsias científicas internas à Química Verde

De acordo com Reis (2009), as controvérsias fazem parte da própria dinâmica da ciência, como projetos de pesquisas ou paradigmas divergentes que debatem sobre a primazia na explicação de um fenômeno. Na QV essa controvérsia interna se apresenta, por exemplo, em compreensões diferentes, e mesmo divergentes, sobre qual a natureza da QV e seu papel na comunidade científica. Neste sentido, Howard-Grenville *et al.* (2017) fazem entrevistas com químicos defensores da QV atuantes em diferentes atividades e constatarem visões bastante distintas sobre a QV: uma visão teórica ou acadêmica, uma visão pragmática e uma visão moralizante. Os autores notaram que essas visões entravam em choque nos discursos dos defensores da QV revelando tensões de qualidade, complexidade e compromisso, conforme Figura 1.

Figura 1: Diferentes visões dos defensores da QV e suas tensões de valores.



Fonte: adaptado de Howard-Grenville *et al.* (2017).

Para responder aos interesses dos químicos acadêmicos, os proponentes da QV ressaltam o grau de inovação dos conhecimentos e as possibilidades criativas do campo, como visto no trabalho de Anastas e Williamson (1996). Diversos autores (ANASTAS, BEACH, 2007; CLARK, 1999; POLIAKOFF et al., 2002) sinalizam o fator econômico como inerente ao próprio significado do termo verde na QV, buscando atender aos interesse de químicos gestores e industriais, aliando o objetivo ambiental ao lucro. Dessa forma, Clark (1999) destaca a redução dos custos com tratamento de resíduos por meio da QV e Poliakoff et al. (2002) apontam que as agências de financiamento exigem que as pesquisas sejam de interesse industrial e vantajosas economicamente. Em contrapartida, alguns trabalhos também buscam apresentar a QV como uma resposta aos problemas ambientais. Llored e Sarrade (2016) destacam que a grande contribuição da QV é colocar as questões ambientais dentro da definição do objeto e da construção do conhecimento químico. Anastas e Williamson (1996) justificam a existência da QV a partir da responsabilidade do químico, detentor dos conhecimentos, em refletir e transformar a sua prática considerando os impactos ambientais.

Em síntese, os trabalhos pioneiros da QV e pesquisas posteriores ao período de emergência da mesma, demonstram que há uma pluralidade de entendimentos sobre a natureza do campo e seu alcance, apresentando características de uma controvérsia interna à ciência (REIS, 2009). Os interesses desses divergentes grupos promovem tensões ou controvérsias dentro do campo da QV, como tipificadas por Howard-Grenville *et al.* (2017). Embora os proponentes da QV tentem promover a compatibilidade entre a dimensão econômica e ambiental, essa tensão não está resolvida, como mostra a pesquisa de Howard-Grenville *et al.* (2017), realizada mais de 15 anos após os primeiros trabalhos da QV. Essa tensão reflete a incompatibilidade entre interesses econômicos, ambientais e acadêmicos, resultando na própria dificuldade em realizar a interação sinérgica entre esses domínios, como propõe a QV. Essa parece ser a raiz da controvérsia mais extrínseca à QV, abordando seu aspecto social e ambiental, portanto, envolve a questão da (in)sustentabilidade. Aspectos que serão discutidos a seguir.

Controvérsias sociocientíficas e socioambientais a partir da Química Verde

De acordo com Reis (2009), as controvérsias internas da ciência, ou os conhecimentos que dela são gerados, podem ter implicações na sociedade e no ambiente. No caso da QV, as controvérsias internas e externas se fundem na relação entre economia e ambiente, com os químicos verdes defendendo a possível compatibilidade entre essas dimensões.

Diversos autores da QV (WINTERTON, 2003; ANASTAS, BEACH, 2007) defendem a possibilidade de uma interação sinérgica entre crescimento econômico e preservação ambiental por meio de inovações tecnológicas. Todavia, essa correlação entre inovação tecnológica e aumento da produtividade é um debate extenso e ainda não resolvido na literatura (BRYNJOLFSSON; ROCK; SYVERSON, 2017). Debref (2012), investigando a QV, constata que o conceito de inovação tecnológica não está definido no campo e que as estratégias já propostas na QV perdem seu sentido ambiental em favor de interesses econômicos, como maximização do lucro. Para esse autor, a busca de inovação tecnológica pode ter o efeito oposto ao desejado ao acelerar a criação de produtos e serviços, rapidamente consumidos pela população, aligeirando o esgotamento dos recursos.

A inovação tecnológica suscita outra controvérsia: a ineficiência intrínseca das tecnologias explicada pela lei termodinâmica da Entropia (GEORGESCU-ROEGEN, 1971), que se refere à dissipação de energia nos processos de transformação da matéria-energia (MELO, 2006). Para Melo (2006), os limites entrópicos ao crescimento econômico expõem a fragilidade do conceito de desenvolvimento sustentável, ao considerar que qualquer produção industrial inevitavelmente se dará pelo aumento de entropia e, conseqüentemente, pela degradação de

energia e matéria útil. Os limites termodinâmicos interferem diretamente nos objetivos de prevenção de poluição e de perigo expostos pela QV. No entanto, pesquisas mostram que as relações entre QV, sustentabilidade e limites termodinâmicos são incipientes e pouco claras na literatura em QV, ainda que os químicos defendam a possibilidade do desenvolvimento sustentável e a QV como um caminho para seu alcance (MARQUES et al., 2014; MARQUES; MACHADO, 2014).

Ignorar a entropia pode passar a falsa sensação de que as alternativas apontadas pela QV são condições suficientes para alcançar a sustentabilidade e impedir que se alcancem transformações efetivas nas práticas químicas. Com o aumento da produção e do consumo, é pouco plausível que a sustentabilidade ambiental possa ser alcançada (CECHIN, 2012).

Tendo como pano de fundo o processo produtivo, pode-se avaliar criticamente o que é estar numa trajetória sustentável (CECHIN, 2012), o que passa por uma revolução dos processos econômicos e produtivos, mas também por uma revolução cultural e social (GEORGESCU ROEGEN, 1971).

Conforme apresentado, o cerne da controvérsia socioambiental da QV é a desconsideração, pelos próprios químicos verdes, dos seus limites, principalmente os impostos pela lei da entropia. Isso limita as possibilidades de ação e transformação da QV e pode produzir resultados diferentes do esperado. A controvérsia ocorre pelo questionamento da veracidade do quadro epistemológico que aborda o problema, conforme tipificado por Deville e Harding (1997), colocando a QV no embate entre interesses sociais divergentes, como o crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental. O reconhecimento das incertezas, dos contingentes e dos limites da prática científica (como os da QV) abre possibilidades para desmistificar a imagem de ciência e tecnologia como superiores na tomada de decisão e salvacionistas, o que será abordado na seção seguinte.

Potencial das Controvérsias no Ensino da Química Verde

Conforme explicitado por nossa análise, há uma controvérsia interna referente à QV que é expressa pelo entendimento conflituoso de qual é a natureza da QV, dúvidas se ela produz conhecimento novo ou se atrapalha o avanço do conhecimento. Compreender essas controvérsias geradas a partir de interesses permite entender que a ciência é um processo conflituoso, em que fatores externos influenciam a adoção de paradigmas e a criação de conhecimento.

Rosa e Auler (2016) sinalizam que “há um silenciamento sobre a presença de valores na concepção e produção da CT” (p. 214). Assim, com base em alguns estudos, consideram que é impossível excluir todos os valores sociais e interesses da prática científica e é necessário ampliar a participação da sociedade desde a gênese da produção da ciência e tecnologia. Essa participação ampla exige que a educação contribua para desmistificar a imagem hermética de ciência e tecnologia, explicitando seus conflitos e sua dinâmica, mostrando as lacunas e possibilidades de participação social, por meio da ação organizada de grupos sociais e do debate amplo entre pesquisadores e a sociedade sobre a agenda de pesquisa e os parâmetros de avaliação de impactos sociais e ambientais (ALVES; SILVA, 2015; ROSA; AULER, 2016).

Conhecimentos próprios da ciência e tecnologia podem ajudar a desmistificar a prática científica e tecnológica, como as leis da termodinâmica e as métricas de avaliação. As métricas são ferramentas que podem ajudar na tomada de decisão sobre os processos ou sínteses químicas menos poluentes (DUARTE; RIBEIRO; MACHADO, 2015). Evidencia-se a importância das métricas holísticas (Matriz Verde, Círculo Verde, Quadro Verde e Estrela Verde), desenvolvidas para avaliar a verdura química de um composto, reação química,

experimento, por exemplo, com base nos 12 princípios da QV (MACHADO, 2014). A sua construção e análise dos princípios envolve um processo de escolha e tomada de decisão com maior responsabilidade sobre o que fazer acerca de uma prática química de síntese, por exemplo (DUARTE; RIBEIRO; MACHADO, 2015), mostrando como a definição de valores e objetivos é importante para direcionar a prática química. Todo esse processo possibilita desenvolver uma visão mais realista do que é a química sintética e os desafios da QV na melhoria dos processos (DUARTE; RIBEIRO; MACHADO, 2015). Nesse sentido, a avaliação da verdura química de um composto ou reação química permite explorar a complexidade da Química e compreender melhor os limites da QV nesse processo de escolhas, desmistificando o seu caráter salvacionista.

Considerações Finais

A controvérsia socioambiental principal da QV é decorrente do pouco diálogo, por vezes da secundarização, dos limites impostos pela Lei da Entropia, portanto de realizar uma transformação química sem impactos ambientais. Desconsiderar esses limites impede que se aborde a questão da insustentabilidade, que é inerente e determinada pelas leis físicas e que concorrem com as teorias econômicas que embasam o sistema capitalista, em particular que determinam seu modo de produção, o hiperconsumo e padronizam nosso modo de vida. São aspectos que demarcam interesses e mascaram a necessidade de uma mudança sistêmica na sociedade, na cultura e nas tecnologias. Assim, no ensino de QV, a própria inclusão da segunda lei da termodinâmica e das análises sistêmicas de eMergia (com M) (PEROSA; GONELLA; SPAGNOLO, 2019), por exemplo, possibilitará desmistificar a imagem salvacionista e tecnicista que a QV pode passar, isto é, de que se constitui como o caminho suficiente para o alcance da sustentabilidade, introduzindo a necessidade de mudanças mais profundas.

Agradecimentos e apoios

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Códigos de Financiamentos: 88882.345361/2019-01, 88887.373148/2019-00, 88887.178071/2018-00 e este último também com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC).

Referências

- ALVES, A. H. B.; SILVA, A. F. G. Manifestações de Obstáculos Gnosiológicos para a Seleção de Conteúdos na Implementação de um Currículo Crítico em Ciências Naturais. **ALEXANDRIA - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v.8, n.1, p.181-207, maio, 2015.
- ANASTAS, P. T.; BEACH, E. S. Green chemistry: the emergence of a transformative framework. **Green Chemistry Letters and Reviews**, v. 1, n. 1, p. 9–24, mar. 2007.
- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green Chemistry: Theory and Practice**. New York, N.Y: Oxford University Press, 1998.
- ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. Green Chemistry: An Overview. In: ANASTAS, P. T.; WILLIAMSON, T. C. (Org.). **Green Chemistry: Designing Chemistry for the Environment**. Washington, DC: American Chemical Society, 1996. v. 626. p. 1–17.
- BRYNJOLFSSON, E.; ROCK, D.; SYVERSON, C. **Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics**. Working Paper, nº 24001. Educação CTS/CTSA e Alfabetização Científica e Tecnológica

Chicago: National Bureau of Economic Research, nov. 2017.

CECHIN, A. D. Georgescu-roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema? In: LÉNA, P.; NASCIMENTO, E. P. do (orgs). **Enfrentando os limites do crescimento: sustentabilidade, decrescimento e prosperidade**. Rio de Janeiro: Garamond, 2012, p. 349-370.

CLARK, J. H. Green chemistry: challenges and opportunities. **Green Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 1999.

DEBREF, R. The Paradoxes of Environmental Innovations: The Case of Green Chemistry. **Journal of Innovation Economics Management**, v. 9, n. 1, p. 83–102, 16 abr. 2012.

DEVILLE, A.; HARDING, R. **Applying the precautionary principle**. Sydney: The Federation Press, 1997.

DUARTE, R. C. C.; RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Using Green Star Metrics To Optimize the Greenness of Literature Protocols for Syntheses. **Journal of Chemical Education**, v. 92, n. 6, p. 1024–1034, 9 jun. 2015.

EILKS, I.; SJÖSTRÖM, J.; ZUIN, V. G. The responsibility of Chemists for a better world: challenges and potentialities beyond the lab. **Revista Brasileira de Ensino de Química**, v. 12, n. 1, p. 97–105, 2017.

EILKS, I.; ZUIN, V. G. Editorial Overview: Green and Sustainable Chemistry Education (GSCE): Lessons to be learnt for a safer, healthier and fairer world today and tomorrow. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. A4–A6, out. 2018.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The Entropy Law and the Economic Process**. Lincoln, USA: Harvard University Press, 1971.

HOWARD-GRENVILLE, J. *et al.* “If Chemists Don’t Do It, Who Is Going To?” Peer-driven Occupational Change and the Emergence of Green Chemistry. **Administrative Science Quarterly**, v. 62, n. 3, p. 524–560, set. 2017.

MACHADO, A. A. S. C. **Introdução às Métricas da Química Verde: uma visão sistêmica**. 1. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014.

MANLEY, J. B.; ANASTAS, P. T.; CUE, B. W. Frontiers in Green Chemistry: meeting the grand challenges for sustainability in R&D and manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 6, p. 743–750, abr. 2008.

MARCELINO, L. V.; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Intellectual Authorities and Hubs of Green Chemistry. In: MUGNAINI, R. (Org.). **Data and Information in Online Environments**. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 319. p. 190–210.

MARCELINO, LEONARDO VICTOR; PINTO, A. L.; MARQUES, C. A. Scientific specialties in Green Chemistry. **Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication**, v. 1, n. 1, 21 jun. 2020.

MARQUES, C. A. *et al.* Compreensões de Pesquisadores Químicos sobre Sustentabilidade Ambiental: possíveis influências na formação de professores de Química. **Revista Brasileira de Ensino de Química**, v. 9, n. 2, p. 79–91, 2014.

MARQUES, C. A.; MACHADO, A. A. S. C. Environmental Sustainability: implications and limitations to Green Chemistry. **Foundations of Chemistry**, v. 16, n. 2, p. 125–147, 1 jul. 2014.

MARTÍNEZ PÉREZ, L. F.; PARGA LOZANO, D. L. La emergencia de las cuestiones sociocientíficas en el enfoque CTSA. **Góndola**. v 8, n. 1, p. 23-35, 2013.

- MATLIN, S. A. *et al.* The role of chemistry in inventing a sustainable future. **Nature Chemistry**, v. 7, n. 12, p. 941–943, dez. 2015.
- MELO, M. M. DE. **Capitalismo versus sustentabilidade: o desafio de uma nova ética ambiental**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.
- PEROSA, A.; GONELLA, F.; SPAGNOLO, S. Systems Thinking: Adopting an Emergy Perspective as a Tool for Teaching Green Chemistry. **Journal of Chemical Education**, v. 96, n. 12, p. 2784–2793, 10 dez. 2019.
- REIS, P. R. Editorial: Ciência e Controvérsia/Science and Controversy. **Revista Uniso**, v. 35, n. 2, p. 09-15, dez., 2009.
- 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**. 2016. 346 f. Tese (Doutorado em Educação Científica e Tecnológica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- ROSA, S. E.; AULER, D. Não neutralidade da ciência-tecnologia: problematizando silenciamentos em práticas educativas CTS. **ALEXANDRIA - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 2, p. 203-231, 24 nov. 2016.
- SCHUMMER, J. Scientometric studies on chemistry II: Aims and methods of producing new chemical substances. **Scientometrics**, v. 39, n. 1, p. 125–140, 1997.
- TUNDO, P. *et al.*, Synthetic pathways and processes in green chemistry. Introductory overview. **Pure and Applied Chemistry**, v. 72, n. 7, p.1207–1228, 2000.
- WINTERTON, N. Sense and sustainability: the role of chemistry, green or otherwise. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 5, n. 1, p. 8–20, 1 mar. 2003.
- ZANDONAI, D. P. *et al.* Green Chemistry and the Training of Chemists: a Report of a Didactic Experience Outside the Learning Laboratory. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, 2014.