

A Ciência Química e a Emergência Climática

Chemical Science and the Climate Emergency

Cleber Antônio Lindino¹

1. Graduação em Química (Bacharelado e Licenciatura) pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Mestre em Química Analítica pela UFSCar. Doutor em Ciências pela UFSCar. Professor Associado na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *Campus* Toledo. É docente permanente nos Programas de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e em Química. Líder do Grupo de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais (GEPECIA). Líder do Grupo Interdisciplinar de Pesquisas em Fotoquímica e Eletroquímica Ambiental (GIPEFEA). Coordenador do Laboratório de Estudos em Química Analítica Limpa (LEQAL). ORCID: [0000-0003-2465-0764](https://orcid.org/0000-0003-2465-0764)

lindino99@gmail.com

Palavras-chave

Clima
 Poluição
 Processos químicos
 Química verde

Keywords

Climate
 Pollution
 Chemical processes
 Green chemistry

Resumo:

As transformações do clima ao longo dos últimos séculos e o conseqüente aumento na temperatura média global devido à influência humana tem feito com que os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) apresentem cenários que evocam não mais as mudanças climáticas, mas a emergência climática, ou seja, a necessidade de que ações reducionistas ou mitigadoras sejam adotadas urgentemente pelos países, entre elas a diminuição na emissão de gases de efeito estufa, para que não haja uma crise sem precedentes. A Química, vista muitas vezes como uma das principais causadoras destes efeitos, pode e deve ser o contraponto a esta visão, no momento em que adota princípios da chamada Química Verde, na qual a principal premissa é a redução da emissão de substâncias poluentes no ambiente, pensando os processos químicos em sua integralidade, do planejamento de moléculas ao destino final, ao ciclo de vida ou reaproveitamento. Ao assumir a responsabilidade pelo que produz, a Química é uma aliada importante na resolução de diversos problemas ambientais, entre eles, as mudanças climáticas, devendo assumir o compromisso de fazer a diferença nas ações urgentes para alcançar a justiça climática, em uma abordagem integrada entre o componente físico e o componente social ambiental.

Abstract:

Climate changes over the last few centuries and the consequent increase in average global temperature due to human influence have led the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) to present scenarios that no longer evoke climate change, but the climate emergency, that is, the need for reductionist or mitigating actions to be urgently adopted by countries, including the reduction in the emission of greenhouse gases, so that there is no unprecedented crisis. Chemistry, often seen as one of the main causes of these effects, can and should be the counterpoint to this view when it adopts principles of the so-called Green Chemistry, in which the main premise is the reduction of the emission of polluting substances in the environment thinking about chemical processes in their entirety, from the design of molecules to their final destination, life cycle or reuse. By taking responsibility for what it produces, Chemistry is an important partner in solving several environmental problems, including climate change, and must assume the commitment to make a difference in urgent actions to achieve climate justice, in an integrated approach between the physical component and the environmental social component.

Artigo recebido em: 20.02.2023.

Aprovado para publicação em: 15.03.2023.

INTRODUÇÃO

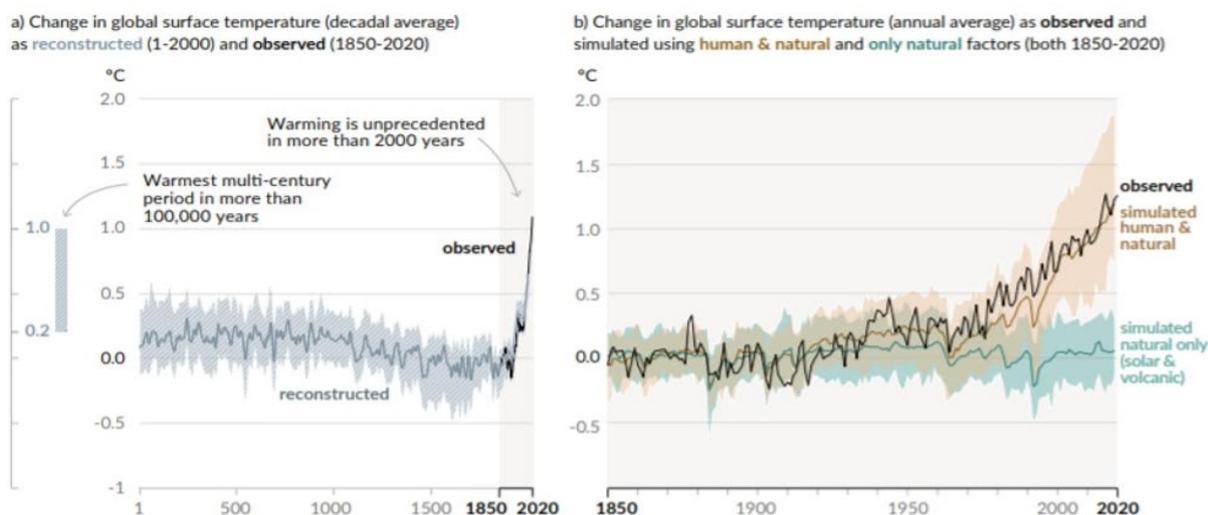
Desde que foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática

(IPCC, em inglês) produziu cinco grandes relatórios de avaliação (*Assessment Report - AR*), sendo o primeiro publicado em 1990. Estes relatórios têm alertado o mundo sobre o aumento na temperatura média do planeta e os consequentes resultados desastrosos.

O terceiro e último tomo de seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6) foi publicado em abril de 2022 e traz as contribuições do Grupo de Trabalho 3 do IPCC, que trata de mitigação (redução de emissões de gases de efeito estufa). Os 268 integrantes do grupo, de 65 países, incluindo o Brasil, revisaram mais de 8.000 publicações científicas. E, de acordo com este relatório, estima-se que as atividades humanas tenham causado aproximadamente 1,0°C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais, com uma variação provável de 0,8°C a 1,2°C.

Na taxa atual, o aquecimento global atingirá 1,5°C (confiança alta¹) entre os anos de 2030 e 2052. Este aumento é sem precedentes nos últimos 2.000 anos e modelos de simulação mostram a contribuição humana a esta mudança havendo convergência estatística entre os modelos e os dados experimentais (Figura 1).

FIGURA 1. A influência humana sobre o aquecimento global



FONTE: Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf (2023).

As emissões antrópicas do período pré-industrial até o presente persistirão por séculos a milênios e continuarão a causar mais mudanças em longo prazo no sistema climático, sendo que os modelos projetam aumentos na temperatura média na maioria das regiões terrestres e oceânicas (alta confiança), extremos quentes na maioria das regiões habitadas (alta confiança), precipitação intensa em várias regiões (confiança média²) e probabilidade de seca e déficits de precipitação em algumas regiões (média confiança) (TONETTO, 2020; IPCC, 2022).

As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) no mundo foram de 59 bilhões de toneladas em 2019, um valor 12% maior do que em 2010 e 54% maior do que em 1990. **A última década teve o maior crescimento de emissões da história humana:** 9,1 bilhões de toneladas a mais do que na década anterior – mesmo com a consciência da escala do problema e da urgência da ação (IPCC, 2022).

Os últimos relatórios do IPCC trazem à tona que não se pode mais somente considerar o termo mudança climática (modificações lentas, de médio e longo prazos, com possibilidade de reversão), mas de emergência climática (estado de crise, eventos extremos, curto prazos de alterações e de tomada de decisões). Assim,

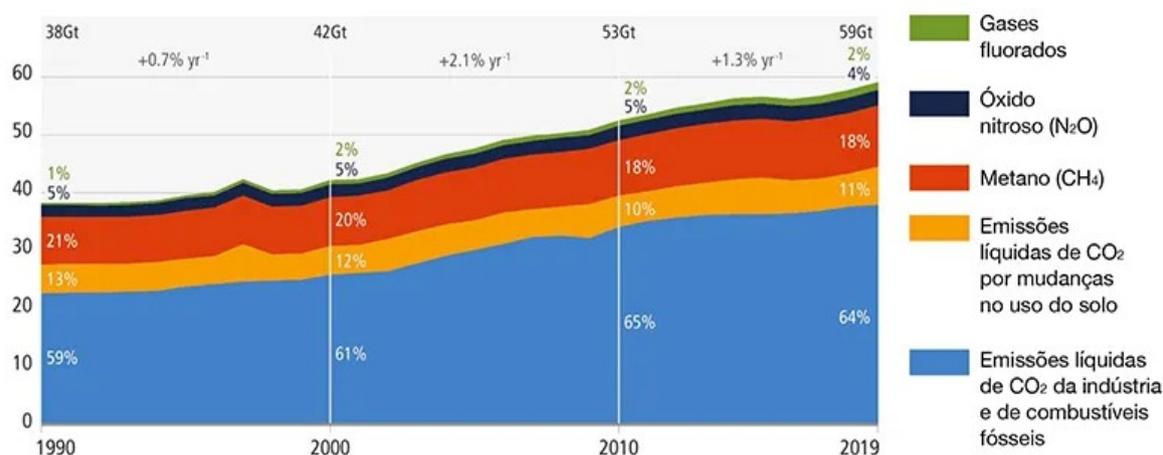
considerando que todas as atividades humanas têm contribuído, em menor ou maior grau para emissão de poluentes que impactam no aquecimento global, questiona-se: qual o papel da Química na questão climática?

Este trabalho tem o objetivo de discutir o papel da Ciência Química nas mudanças climáticas e indicar algumas estratégias para diminuição de seu impacto ambiental.

O PAPEL DA QUÍMICA NA CRISE AMBIENTAL

Tradicionalmente, a Química tem sido bastante associada a imagem negativa como sendo essencialmente poluidora e com forte responsabilidade sobre a crise ambiental. Por exemplo, os relatórios do IPCC indicam o aumento da emissão de gases dos efeitos estufa (GEEs) desde 1990, provenientes principalmente da combustão de combustíveis fósseis e de indústrias, muitas delas do ramo químico, o que contribui para a má fama da Química (Figura 02).

FIGURA 2. Emissões globais de gases do efeito estufa (GEEs), em bilhões de toneladas (Gt), no período de 1990 a 2019



Fonte: IPCC, 2022, adaptado da versão original em inglês pelo jornal da USP. <https://jornal.usp.br/ciencias/emergencia-climatica-solucoes-existem-mas-e-preciso-agir-agora/> (2023).

A mudança climática também afeta a qualidade da água, pois leva ao esgotamento de fontes de água potável (escassez devido às secas prolongadas, por exemplo), podendo propiciar extensa contaminação³, devido ao aumento nas concentrações de contaminantes seja pela diminuição do solvente (a própria água), seja devido à intensidade de precipitação que transporta os contaminantes de um para outro compartimento ambiental, resultando na deterioração da qualidade da água (JOSEPH et al., 2022). Esta contaminação pode ser agravada devido a processos químicos provenientes de fontes poluidoras, devido ao descaso ou leniência da legislação em vigor ou tecnologias de purificação de água ainda pouco eficazes no tratamento de determinados efluentes como o caso dos contaminantes de preocupação emergente⁴.

Apesar desta visão negativa da Química, Machado e Marques (2014) ressaltam que “[...] os benefícios proporcionados à humanidade superam os problemas causados pelos processos químicos [...]” e que “[...] há a inevitabilidade das degradações energético-materiais das transformações químicas”. Segundo estes autores, do ponto de vista termodinâmico, a dissipação de energia e materiais é um princípio fundamental da entro-

pia⁵ significando que, uma vez prontos produtos e materiais, a tendência futura é a sua degradação, gerando subprodutos muitas vezes indesejáveis, contaminando e poluindo ambientes naturais.

Ao assumir esta constatação, os químicos e químicas e todos aqueles envolvidos com a transformação química precisam assumir a responsabilidade sobre os produtos e processos dela resultantes seja monitorando, seja minimizando e, sobretudo, prevenindo os problemas ambientais. Parte dos problemas ambientais causados por transformações químicas ocorrem porque a grande maioria dos produtos saem das linhas de produção sem um estudo mais amplo e de longo prazo que indiquem a rota de degradação e a possível formação de subprodutos danosos ao ambiente que podem inclusive apresentar toxicidade (MACHADO, 2014).

Também é gritante a constatação da ausência de estudos ecotoxicológicos que permitam estabelecer o quanto cada substância ou produtos podem incorrer em danos à biota. Contudo, é importante ressaltar que a Química contribui para praticamente todos os aspectos da vida, desde a produção de combustíveis, alimentos e água potável a medicamentos, produtos de limpeza, cuidados pessoais, bem como uma série de outros produtos, aumentando a expectativa e a qualidade de vida.

Ainda, a indústria química também propicia o crescimento econômico e social para a sociedade moderna. A indústria química contribui com US\$ 5,7 trilhões para o PIB global, que é cerca de 7,1% da produção mundial total e, no processo, suporta 120 milhões de empregos direta ou indiretamente (OXFORD, 2022). De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), o faturamento líquido das empresas do setor no Brasil foi de 142,8 bilhões de dólares em 2021, com participação no PIB total (2021) de 2,6%, ocupando em 2019 a 6ª posição no ranking mundial (ABIQUIM, 2021).

CONTRAPONTO: A QUÍMICA COMO SOLUCIONADORA DE PROBLEMAS AMBIENTAIS

Em contraponto à imagem negativa da Química, um movimento importante na área química com preocupação ambiental surgiu em 1998, com a publicação do livro *Green Chemistry: Theory and Practice*, de autoria de Paul Anastas e John Warner e ocorreu na consequência das conferências de discussão ambiental (Conferência de Estocolmo, Conferências Mundiais do Clima, Rio 92, as COPs etc.) instituindo o conceito ou o princípio da Química Verde. A Química Verde pode ser definida como o desenho, desenvolvimento e implementação de produtos químicos e processos para reduzir ou eliminar o uso ou geração de substâncias nocivas à saúde humana e ao ambiente (ANASTAS e WARNER, 1998).

O conceito de Química Verde pressupõe que os processos químicos podem ser substituídos por alternativas menos poluentes ou não-poluentes. Essas práticas visam às tecnologias mais limpas e sustentáveis tanto nas indústrias químicas como nas instituições de ensino, realizando a prevenção dos processos na fonte com a utilização de produtos renováveis e recicláveis, produzir alternativas que sejam autossustentáveis e que gerem eficiência de energia e estando em conformidade com os requisitos legais no uso de substâncias que podem ser persistentes, bioacumulativas e tóxicas, principalmente a vida humana e ao ambiente (LENARDÃO et al, 2003).

Foram estabelecidos 12 princípios elementares que devem ser seguidos para a implementação da Química Verde, visando processos cada vez mais limpos, seguros e sustentáveis, expostos no Quadro 1 (ANASTAS e WARNER, 1998; LENARDÃO et al, 2003; MACHADO, 2014).

QUADRO 1. Doze princípios da Química Verde

1	Prevenção de resíduos	É melhor prevenir a formação de resíduos do que ter que tratá-los.
2	Economia Atômica	As sínteses devem ser planejadas de modo a incorporar no produto final, o máximo de átomos utilizados no processo.
3	Sínteses menos perigosas	Planejar as sínteses de modo a produzir substâncias pouco ou não tóxicas para a ecossfera.
4	Planificação em nível molecular	Os produtos químicos devem cumprir suas funções com o mínimo de toxicidade.
5	Solventes e substâncias auxiliares mais seguros	Evitar substâncias auxiliares com alto impacto à saúde e ao ambiente.
6	Eficiência energética	Minimizar os gastos energéticos na produção de produtos químicos.
7	Uso de matérias-primas renováveis	Utilizar, sempre que possível, materiais e recursos renováveis.
8	Redução da derivatização	Diminuir etapas na produção de substâncias.
9	Uso de catalisadores	Potencializar o uso de catalisadores seletivos, visando cinéticas de reações rápidas, com menor uso de reagentes e menor geração de resíduos.
10	Planejar a degradação	Produzir produtos químicos que não persistam no ambiente e se decomponham em subprodutos inócuos.
11	Análise em tempo real	Monitorar processos para o controle precoce da formação de substâncias perigosas.
12	Segurança ocupacional	Minimizar a potencial ocorrência de acidentes químicos.

Fonte: Adaptador de Machado (2014).

Com estes princípios, a comunidade química procurou modificar técnicas e processos químicos para minimizar o impacto no ambiente e encontrar caminhos para a real sustentabilidade. A planificação de uma estratégia para um processo ou técnica se adequar aos princípios da Química Verde envolve métricas já bem estabelecidas (MACHADO, 2014) e permite avaliar de modo concreto e com confiança esta mudança, evitando o efeito *Greenwashing*⁶ (FREITAS NETO *et al.*, 2020).

Diferentes estratégias foram, portanto, desenvolvidas considerando-se os princípios da Química Verde, entre elas as ações mitigadoras convencionais como o uso de energia renovável, a captura, estocagem e utilização de carbono atmosférico, a melhoria na eficiência de motores para ocasionar menor consumo de combustíveis, entre outros. Outra estratégia é o uso de tecnologias chamadas de emissão negativa como a captura de carbono.

O princípio básico por trás da tecnologia é que a biomassa captura biologicamente o CO₂ da atmosfera por meio da fotossíntese durante o seu crescimento, que é então utilizado para a produção de energia por meio da combustão. As emissões de CO₂ realizadas na combustão são então capturadas e armazenadas em reservatórios geológicos adequados ou sendo reabsorvidas pela biomassa.

Ainda são consideradas estratégias que minimizam impactos as que envolvem o reflorestamento, o uso de biocarvões (*biochar*) que podem ser utilizados para fornecimento de energia, para uso em sistemas de filtração, para recomposição de matéria orgânica em solos degradados. Contudo, mesmo que a implementação de princípios da Química Verde em processos produtivos tenha gerado sucessos e conquistas ambientais, sociais e econômicas, ainda são uma pequena fração do potencial ainda a ser aplicado, pois a implementação sistemática em todos os setores e na cadeia produtiva ainda precisa de novos passos para levar à sustentabilidade (ZIMMERMAN *et al.*, 2020).

O fato de tradicionalmente o setor químico ter adotado estratégias reducionistas isoladas, como, por exemplo, a diminuição da emissão de gases de efeito estufa, diminuição no consumo de energia e água, implica em desempenho geral insatisfatório, por ser restrito e específico. Zimmerman et al., (2020, p. 399) comentam que é preciso

[...] pensar de maneira mais ampla não apenas sobre o desempenho restrito e específico, mas também sobre o efeito que um produto ou processo pode ter sobre o meio ambiente, o trabalhador ou o consumidor. Isso exigirá um conjunto de habilidades disciplinares mais diversificado do que apenas engenheiros mecânicos, por exemplo.

Para tanto, diminuir a dependência da matriz dos combustíveis fósseis é importante para revolucionar os processos químicos, tomando como exemplo, a natureza. A natureza tem um ciclo de renovação e aproveitamento de recursos invejável que se pode tomar como modelo (TRIBUTSCH, 2014). Celulose, quitina e queratina são materiais estruturais com propriedades mecânicas e biológicas muito eficientes e que, modificadas, estão distribuídas por inúmeras espécies na natureza (TRIBUTSCH, 2014).

Estudar estas estruturas e desenvolver materiais baseados nelas, pode ser um salto tecnológico visando a sustentabilidade e a Química Verde. Em relação à obtenção de energia, a tecnologia humana utiliza geradores que enviam energia por meio de elétrons em condutores elétricos. Na natureza, é muito comum a geração e uso de energia baseada no gradiente de prótons (H_3O^+) através de uma membrana em compartimentos fechados. São exemplos deste processo, a fotossíntese e a geração de energia nas mitocôndrias. A eficiência é muito alta (TRIBUTSCH, 2014).

Um exemplo interessante de aplicação de materiais baseados na natureza em soluções tecnológicas é o uso de hidroxiapatita em implantes ósseos (ARCOS e VALLET-REGI, 2020). A hidroxiapatita é um composto mineral constituído principalmente de fosfatos (PO_4) e cálcio (Ca) e está presente em ossos e dentes. Estudando a composição, estrutura cristalina e rotas de síntese é possível desenvolver materiais tecnológicos que substituem ou recompõem partes danificadas de ossos, com taxas de rejeição baixas pelo organismo e recuperação mais rápida do paciente (ARCOS e VALLET-REGI, 2020).

A utilização de hidrogênio (H_2) como matriz energética é outra ferramenta na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. O hidrogênio é um transportador de energia caracterizado pela ausência da emissão de gases de efeito estufa (SANTOS et al, 2017). O hidrogênio renovável (ou hidrogênio verde) é produzido por eletrólise usando fontes de energia renovável e é uma rota de produção de carbono quase zero (IRENA et al., 2019).

O potencial disponível para a produção de eletricidade verde a partir de energia eólica, solar e hídrica, que tem impacto ambiental, mas em escala muito menor que a dos combustíveis fósseis, por exemplo, é suficiente para cobrir todo o consumo atual de eletricidade, bem como para a produção de hidrogênio verde (KAKOULAKI et al., 2021)

Adotar a Química Verde induz a diversos benefícios extras como a otimização de materiais e energia, que diminui custos e a geração de resíduos, com melhoria do ambiente ocupacional e, conseqüentemente, menos danos à saúde de trabalhadores, além de fortalecer a imagem ambiental da empresa frente aos sócios, investidores e clientes. A prática da Química Verde não pode ser isolada, mas sim deve ser integradora entre diferentes atores no processo de produção de produtos químicos.

Deve ser capaz de prever as transformações químicas futuras das substâncias produzidas, o quanto estas substâncias podem apresentar risco para o ecossistema e deve induzir ações de prevenção ou mitigadora de

danos ambientais. Almeja aumentar a eficácia da Química, buscando que os impactos negativos da mesma no ambiente físico sejam diminuídos, assim como para a saúde humana.

Isto significa disseminar a cultura da Química Verde em Instituições de Ensino⁷, em treinamentos no setor produtivo, na discussão de planejamento de novos produtos e na formulação de políticas públicas ambientais. Isto significa adotar posição híbrida na tomada de decisões. A posição híbrida indica que os deveres (no caso, de adotar princípios de Química Verde) não recaem apenas sobre Estados (responsável pela formulação de leis e a fiscalização de sua aplicação), mas também em outros tipos de agentes. A lógica da posição híbrida é que todos os agentes que são responsáveis por emissões de poluentes estejam sob a obrigação de reduzir estas emissões (CANEY, 2010).

Muitos são os agentes que, além de governos, desempenham um papel na aplicação da Química Verde, a saber, indivíduos, empresas e autoridades políticas. Esta visão, contudo, não pode justificar políticas que impliquem que as gerações futuras devem pagar pela mudança climática, pressupondo que elas serão mais ricas e tecnologicamente mais avançadas do que as gerações atuais e, portanto, mais capazes de resolver os problemas. Isso levaria a uma política de não impedir, no momento atual, as mudanças climáticas direcionando para o futuro as ações necessárias, o que poderá ser tarde demais.

Caney (2010) indica que há, pelo menos, duas razões para isso. “Primeiro, embora as pessoas no futuro possam ter mais riqueza, os custos também serão muito maiores” (2010, p. 220). Teremos um custo menor se evitarmos que o problema surja do que nos adaptarmos a ele. “Em segundo lugar, se a mitigação não acontecer agora, haverá mudanças climáticas perigosas às quais as pessoas não conseguirão se adaptar”. Uma falha nas ações de mitigação, portanto, inevitavelmente resultaria em prejuízo para algumas pessoas futuras e “seria errado conscientemente permitir que um erro ocorresse com a intenção de compensar aqueles injustiçados posteriormente” (2010, p. 220).

O fortalecimento das capacidades de ação climática das autoridades nacionais e subnacionais, sociedade civil, setor privado, povos indígenas e comunidades locais pode apoiar a implementação de ações ambiciosas implicadas na limitação do aquecimento global a 1,5°C (alta confiança). A cooperação internacional pode proporcionar um ambiente propício para que isso seja alcançado em todos os países e para todas as pessoas, no contexto do desenvolvimento sustentável. A cooperação internacional é um facilitador crítico para países em desenvolvimento e regiões vulneráveis (alta confiança).

Ao assumir a responsabilidade pelo que produz, a Química é uma aliada importante na resolução de diversos problemas ambientais, entre eles, as mudanças climáticas, devendo assumir o compromisso de fazer a diferença nas ações urgentes para alcançar a justiça climática, em uma abordagem integrada entre o componente físico e o componente social ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma sociedade sustentável dependerá de produtos e processos químicos que sejam projetados de acordo com princípios da Química Verde, propícios à manutenção da vida. Projetos de moléculas precisam ser consideradas desde o estágio inicial para que sejam renováveis, benignos e facilmente degradáveis em subprodutos inócuos. Isto exigirá o melhor da ciência e da inovação para resultar em impacto positivo em escala global.

Esta visão sustentável é conseguida com a abordagem interdisciplinar, intrínseca à área de Ciências Ambientais, o que significa adotar método de construção do conhecimento que se sustenta na compreensão da

complexidade ambiental e na resolução de seus problemas. Sua prática é parte integrante da dinâmica que incorpora as demandas socioambientais na perspectiva do desenvolvimento sustentável.

A Ciência Química, se quiser adotar com firmeza os princípios da Química Verde, deverá se unir a outros ramos da Ciência para juntos, prevenir a crise ambiental que se avizinha para a humanidade.

NOTAS

1. Alta confiança: probabilidade de 8 em 10 chances de ocorrência.
2. Média confiança: probabilidade de 5 em 10 chances de ocorrência.
3. Introdução no meio ambiente (água, ar, solo ou alimentos) de organismos patogênicos, de substâncias tóxicas ou radioativas em concentrações nocivas à saúde dos seres humanos. Fonte: CIMM, 2022.
4. Normalmente não monitorados no ambiente, são contaminantes com grande potencial poluidor, provenientes principalmente de atividades antrópicas e dificilmente removidos por técnicas convencionais de tratamento. Fonte: US Geological Survey. Emerging contaminants. <https://www.usgs.gov/media/videos/emerging-contaminants>.
5. Grandeza termodinâmica que mede o grau de liberdade molecular de um sistema. Fonte: Levine, I. N. Físico-Química, 6a Edição, Editora LTC: São Paulo, 2012.
6. Greenwashing: Desinformação disseminada por uma organização para apresentar ao público uma imagem ambientalmente responsável; uma imagem pública de responsabilidade ambiental promulgado por ou para uma organização, mas percebido como infundado ou intencionalmente enganoso. Fonte: Oxford English Dictionary (2018). Disponível em <https://www.oed.com/> Acesso em 8/09/2022.
7. Algumas iniciativas de currículos “verdes” podem ser encontradas em <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry.html>; <https://www.beyondbenign.org/>; <https://www.rsc.org/newperspectives/sustainability/a-sustainable-chemistry-curriculum/>; <https://www.global-green-chemistry-initiative.com/university-curriculum-section-1>.

REFERÊNCIAS

- ABIQUIM. **O desempenho da indústria química brasileira**, 2021. Disponível em https://abiquim-files.s3.us-west-2.amazonaws.com/uploads/guias_estudos/2bc236800018f99168cf4d8c5fd_Desempenho%2Bda%2BInd%C3%BAria%2BQu%C3%ADmica%2B2021.pdf.
- ANASTAS, P. T. & WARNER, J.; **Green Chemistry: Theory and Practice**, Oxford University Press: Oxford, 1998.
- ARCOS, D. e VALLET-REGI, M. **Substituted hydroxyapatite coatings of bone implants**. *J. Mater. Chem. B*, 8, 1781, 2020.
- CANEY, S. Cosmopolitan Justice, Responsibility, and Global Climate Change. **Leiden Journal of International Law**, Cambridge, vol. 18, p. 747-775, 2005.
- CIMM. Centro de Informação Metal Mecânica. **Contaminação**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/93-contaminacao>. Acesso em 14 de outubro de 2022.
- FAWZY, S.; OSMAN, A.I.; DORAN, J.; ROONEY, D.W. Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- IPCC. Assessment Report 6. Working Group 3. **Summary for Policymakers**. Disponível em <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 25/09/2022.
- IRENA, G. D.; TAIBI, E., MIRANDA, R. 2019. **Hydrogen: A Renewable Energy Perspective**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- JOSEPH, N.; LIBUNAO, T.; HERMANN, E.; BARTELT-HUNT, S.; PROPPER, C. R.; BELL, J.; KOLOK, A. S. Chemical Toxicants in Water: a GeoHealth Perspective in the contexto of climate Change. **GeoHealth**, vol.6, 8, 2022.

KAKOULAKI, G., KOUGIAS, I., TAYLOR, N., DOLCI, F., MOYA, J., JÄGER-WALDAU, A. Green hydrogen in Europe—A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. **Energy Conversion Management** 228, 113649, 2021.

LEVINE, I. N. **Físico-Química**, 6a edição, Editora LTC: São Paulo, 2012.

MACHADO, A. **Introdução às métricas da Química Verde**: uma visão sistêmica. Editora UFSC, 2014.

MARQUES, C.A. & MACHADO, A. Environmental Sustainability: implications and limitations to Green Chemistry. **Found Chem** (2014) 16:125–147. DOI 10.1007/s10698-013-9189-x

OXFORD ECONOMICS. **The Global Chemical Industry**: Catalyzing Growth and Addressing Our World's Sustainability Challenges. Disponível em: <https://www.oxfordeconomics.com/resource/the-global-chemical-industrycatalyzing-growth-and-addressing-our-world-sustainability-challenges/>. Acesso em 20/05/2022.

RAMAN, R.; NAIR, V. K.; PRAKASH, V.; PATWARDHAN, A.; NEDUNGADI, P. Green-hydrogen research: What have we achieved, and where are we going? Bibliometrics analysis. **Energy Reports** 8, 9242–9260, 2022.

SANTOS, K. G.; ECKERT, C. T.; ROSSI, E.; BARICCATTI, R. A.; FRIGO, E. P.; LINDINO, C.A.; ALVES, H. J. Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 68, 563–571, 2017.

TONETTO, M. Princípios da ética ambiental e mudanças climáticas. **Dissertatio**, 52, 35-57, 2020.

US GEOLOGICAL SURVEY. **Emerging contaminants**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/videos/emerging-contaminants>.

ZIMMERMAN, J.B; ANASTAS, P.T.; ERYTHROPEL, H.C.; LEITNER, W. Designing for a green chemistry future. *Science*, Vol 367, Issue 6476, pp. 397-400, 2020. DOI: 10.1126/science.aay3

