

CAIO PALLA MARQUES

EXPERIMENTAÇÃO PEDAGÓGICA E O SISTEMA CARBONATO

Experimentação Pedagógica e o Sistema Carbonato

Edição I

ORGANIZAÇÃO

Caio Palla Marques

AUTORES

Caio Palla Marques

Gildo Giroto Júnior



2025

2025 by Editora Pasteur
Copyright © MARQUES, Caio Palla

Editor Chefe:

Dr. Guilherme Barroso Langoni de Freitas

Corpo Editorial:

Dr. Alaercio Aparecido de Oliveira
(Faculdade INSPIRAR, UNINTER, CEPROMEC e Força Aérea Brasileira)

Dra. Aldenora Maria Ximenes Rodrigues

MSc. Aline de Oliveira Brandão
(Universidade Federal de Minas Gerais - MG)

Dra. Ariadine Reder Custódio de Souza
(Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR)

MSc. Bárbara Mendes Paz
(Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR)

Dr. Daniel Brustolin Ludwig
(Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR)

Dr. Durinézio José de Almeida
(Universidade Estadual de Maringá - PR)

Dra. Egídia Maria Moura de Paulo Martins Vieira
Professora UNIFSA (Centro Universitário Santo Agostinho)

Dr. Everton Dias D'Andréa
(University of Arizona/USA)

Dr. Fábio Solon Tajra
(Universidade Federal do Piauí - PI)

Francisco Tiago dos Santos Silva Júnior
(Universidade Federal do Piauí - PI)

Dra. Gabriela Dantas Carvalho

Dr. Geison Eduardo Cambri

MSc. Guilherme Augusto G. Martins
(Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR)

Dr. Guilherme Barroso Langoni de Freitas
(Universidade Estadual de Maringá - UEM)

Dra. Hanan Khaled Sleiman
(Faculdade Guairacá - PR)

MSc. Juliane Cristina de Almeida Paganini
(Universidade Estadual do Centro-Oeste - PR)

Dra. Kátia da Conceição Machado
(Universidade Federal do Piauí - PI)

Dr. Lucas Villas Boas Hoelz
(FIOCRUZ - RJ)

MSc. Lyslian Joelma Alves Moreira
(Faculdade Inspirar - PR)

Dra. Márcia Astrês Fernandes
(Universidade Federal do Piauí - PI)

Dr. Otávio Luiz Gusso Maioli
(Instituto Federal do Espírito Santo - ES)

Dr. Paulo Alex Bezerra Sales

MSc. Raul Sousa Andreza

MSc. Renan Monteiro do Nascimento

MSc. Suelen Aline de Lima Barros
(Centro Universitário Santo Agostinho)

Dra. Teresa Leal

Saulo Barreto Cunha dos Santos
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul - RN)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Editora Pasteur, PR, Brasil)

M357e MARQUES, Caio Palla

Experimentação Pedagógica e o Sistema Carbonato, MARQUES, C. P. – Porto
Velho, RO: Pasteur, 2025.

1 livro digital; 71 p.; ed. I; il.

Modo de acesso: Internet

ISBN: 978-65-6029-289-5

DOI do Livro: 10.5290/978-65-6029-289-5

1. Experimentação Pedagógica 2. Sistema Carbonato 3. Ensino.
I. Título.

CDD 54

CDU 542

AGRADECIMENTOS

O autor agradece pelos recursos que possibilitaram a publicação do livro:

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no contexto do projeto número de processo 316667/2020-0;

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo 88887.312630/2018-00;

Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO), processo 34530.535.22560.30092018.

PREFÁCIO

Diante do crescente interesse em experimentação pedagógica na área de pesquisa em ensino de ciências, nas décadas recentes, o presente livro apresenta resultados do trabalho de tese “*Experimentação Pedagógica Utilizando Água Mineral e o Sistema Carbonato*”, realizado pelo autor na Universidade Estadual de Campinas e na Universidade Federal de Santa Catarina, entre 2018 e 2023.

Buscando um sistema viável à experimentação pedagógica, de acordo com critérios como acessibilidade, o sistema carbonato é abordado no contexto biogeoquímico, em perspectivas que possibilitam o desenvolvimento do pensamento sistêmico em nível superior de escolaridade. Assim, busca-se uma contribuição no sentido de ampliar a utilização da experimentação e do ciclo do carbono no ensino de ciências.

Boa leitura,
Caio Palla Marques

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - PENSAMENTO SISTÊMICO E A ABORDAGEM DO SISTEMA TERRA: UMA INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO SOBRE A CONCEPÇÃO DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE QUÍMICA.....	8
CAPÍTULO 3 - CICLO DO CARBONO, SISTEMA CARBONATO E O CONTEXTO OCEÂNICO	20

CAPÍTULO 1

PENSAMENTO SISTÊMICO E A ABORDAGEM DO SISTEMA TERRA: UMA INTRODUÇÃO

CAIO PALLA MARQUES¹

¹Docente da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

Palavras-chave: Pensamento Sistêmico; Sistema Terra; Abordagem Didática.



10.59290/978-65-6029-289-5.1

INTRODUÇÃO

A busca por um futuro de maior inclusividade, com equidade social, prosperidade econômica e sustentabilidade ambiental, demanda crescentes e complexos desafios científicos, interconectados, por exemplo, da área de Química, tendo em vista a importância desta área na conquista dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU).

Assim, há uma consequente necessidade crescente na formação de recursos humanos para um contexto mundial que demanda a formação de profissionais qualificados e cidadãos com maior preparação para a vida e para o trabalho, em um cenário de transformações mundiais notáveis, como: o drástico aumento e sofisticação das tecnologias em todos os setores produtivos e sociais; a necessidade do aumento nos modos de produção baseados em economia circular; o desenvolvimento da matriz energética com viabilidade industrial; além da maior cooperação internacional e da crescente cooperação entre áreas científicas distintas¹.

No contexto do que foi mencionado, é fundamentado, tanto em referenciais da área de Química quanto da pesquisa em ensino de Química^{1,2} que o pensamento sistêmico é central para a educação científica. A literatura aponta que “a maneira mais eficaz de adaptar a pesquisa química e a indústria para o novo normal é reimaginar a educação em Química”^{1,2}.

Naturalmente, avanços e adaptações que se tornam necessárias à educação científica são realizações constantes, que têm sido amplamente conquistadas, tanto quanto possível e necessário. Nesse sentido, entende-se que os argumentos citados dentro do contexto mencionado se referem aos desejáveis avanços estratégicos, nos anos recentes, na educação científica, de forma a se conquistar, em maior extensão, os objetivos apresentados, em um contexto global de demandas sociais, tecnológicas e ambientais.

Dessa forma, o presente livro busca contribuir com as pesquisas acerca do desenvolvimento de abordagens para o ensino de Química, utilizando experimentação pedagógica acessível e contextualizada com o sistema carbonato. Este sistema compõe o ciclo biogeoquímico do carbono, cuja compreensão é de grande importância para os estudos nas perspectivas mencionadas como estratégicas ou necessárias nos dias atuais.

O pensamento sistêmico, que pode ser definido como a habilidade de entender e interpretar sistemas complexos, e que permite “uma abordagem para examinar e abordar comportamentos e fenômenos complexos de uma perspectiva mais holística”³, tem sido trabalhado no ensino de Química e, nos anos recentes, especialmente pelo projeto *Systems Thinking in Chemistry for Sustainability: 2030 and Beyond* – STCS 2030+ (<https://sastice.com/systems-thinking-in-chemistry-for-sustainability-toward-2030-and-beyond-stcs-2030/>)^{4,5} projeto da IUPAC que visa, dentre os objetivos voltados à educação formal:

Coordenar, avaliar e divulgar etapas para articular as características essenciais do pensamento sistêmico no ensino de Química, delineando as maneiras pelas quais ele pode apoiar educadores no uso e na avaliação dos resultados dos alunos a partir de outras abordagens pedagógicas. [...] Os esforços do projeto nesta área serão orientados por um subgrupo da força-tarefa com experiência em pensamento sistêmico, pesquisa em educação em Química, desenvolvimento e disseminação de currículos, avaliação, desenvolvimento e implantação de websites e acreditação de programas de Química. Essas atividades serão realizadas com o objetivo específico de fortalecer as contribuições do ensino formal de Química para a ciência da sustentabilidade e para o cumprimento das metas globais de sustentabilidade, como os ODS da ONU, apoiando, assim, as atividades empreendidas na vertente da sustentabilidade⁴.

Na literatura de pesquisa em ensino de Química^{5,6} e em página virtual da IUPAC⁷, há exemplos, utilizando tópicos específicos, de como uma abordagem sistêmica pode ser planejada, bem como a conceituação e fundamentação de sistema, dentre muitos aspectos relevantes ao trabalho nesta perspectiva. Como exemplo, destaca-se o número 12 do volume 96, de 2019, do *Journal of Chemical Education*, uma edição especial inteiramente dedicada a essa temática.

Conforme a literatura, a utilização complementar do pensamento sistêmico no ensino de Química busca educar para formar futuros cidadãos globais e objetiva inserir tal abordagem nos níveis de escolaridade que equivalem, no Brasil, ao ensino médio e ao ensino superior⁸.

No contexto do trabalho pedagógico utilizando o Sistema Terra^{4,14}, a literatura menciona que⁵:

Enquanto reconhecer as conexões entre vários fenômenos seja certamente essencial para os químicos em atividade, bem como a influência que a Química tem em muitas questões planetárias e sociais, há um argumento de que todas as pessoas se beneficiariam da habilidade de interpretar, explicar e tomar decisões mais informadas sobre questões com profunda conexão com a Química^{5,6} como as encontradas quando se considera duas iniciativas globais de sustentabilidade: os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU e a estrutura das Fronteiras Planetárias.

A estrutura dos Limites Planetários fornece uma avaliação quantitativa de nove processos do sistema terrestre de relevância crítica para o desenvolvimento sustentável⁷, e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU fornecem “um modelo para a paz e a prosperidade para as pessoas e o planeta”, estabelecido na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e adotado por todos os Estados-Membros da ONU em 2015^{8,9}. Muitas das métricas para ambas as agendas globais são quantificadas por parâmetros químicos⁵.

De especial interesse, assim, é a aproximação do ensino com a Ciência do Sistema Terra, área que almeja “entender a estrutura e o funcionamento da Terra como um sistema complexo e adaptativo”¹⁰, articulando conhecimentos das mais diversas áreas, como geologia e geofísica, ecologia, ciências ambientais, ciências humanas — em especial as ciências sociais —, Química e Física. Essa área busca compreender as “diversas interações entre energia, matéria e organismos”¹⁰, inserindo-se nessa perspectiva a dinâmica das sociedades humanas em interação com o ambiente da Terra¹⁰, o que é necessário ao ensino de Química em uma perspectiva de pensamento sistêmico^{5,10}.

No contexto do ensino de Química, trabalhos que utilizam, principalmente de forma implícita, abordagens pedagógicas ligadas ao Sistema Terra ou temáticas relacionadas têm sido relatados em periódicos científicos indexados de forma crescente nos anos recentes^{11,12}. Há também um livro disponível que contém uma abordagem introdutória do Sistema Terra para introduzir tópicos de Química Geral¹³.

Há desafios ao se trabalhar com tal sistema na educação em Química, como, por exemplo, realizar um trabalho que abranja apenas o escopo da Química naquele nível de escolaridade, abordando fenômenos em uma perspectiva de pensamento sistêmico com uma transposição didática adequada a cada contexto formal de ensino. Isso deve ocorrer dentro das diretrizes oficiais nacionais, adequando-se o trabalho aos conceitos previstos na ementa e ao

tempo necessário para que a aprendizagem conceitual seja compatível com os objetivos amplos, gerais e específicos de ensino da disciplina, considerando o contexto e os objetivos dos estudantes envolvidos.

Outros desafios dizem respeito às complexidades inerentes à Ciência do Sistema Terra, transdisciplinares por natureza, que envolvem fenômenos com ampla variação no espaço e no tempo, além da rápida atualização de conhecimentos na literatura científica referente a cada fenômeno ou aspecto estudado. Isso requer preparação e planejamento por parte do professor, de modo a abordar a essência representativa fenomenológica necessária e adequada ao contexto pedagógico.

O estudo do Sistema Terra, como se conclui a partir da literatura e das diretrizes oficiais em níveis nacional e internacional, constitui uma oportunidade de abordagem nos ensinos médio e superior, pelas razões e argumentação já expostas. A depender de cada contexto de nível de ensino e institucional, tal estudo pode ser desenvolvido por meio de estudos de caso, divulgação científica, experimentação investigativa, entre outras ferramentas, estratégias e metodologias pedagógicas de ampla utilização no ensino de Química.

O trabalho com ciclos biogeoquímicos, e aspectos relacionados a estes, constitui um escopo necessário e introdutório ao trabalho com o Sistema Terra no ensino de Química em uma perspectiva de pensamento sistêmico. Conforme a literatura, em um contexto abrangente acerca de matéria, um ciclo pode ser definido como “*the quantitative characterization of the flows of specific material into, within, and from a given system*”¹⁴. Um ciclo biogeoquímico, por sua vez, pode ser entendido como^{15,16}:

Qualquer uma das etapas naturais em que os elementos da matéria viva circulam. O termo biogeoquímico é uma contração que se refere à consideração dos aspectos biológicos, geológicos e químicos de cada ciclo¹⁵ [tradução nossa].

Como a própria vida, ciclos biogeoquímicos estão longe do equilíbrio termodinâmico, evoluíram por centenas de milhões de anos e são interdependentes, formando sistemas biogeoquímicos repletos de controles por *feedback*. [...] Ciclos biogeoquímicos dependem e coevoluem com, etapas metabólicas específicas. Assim, ciclos biogeoquímicos dependem e são uma força seletiva na diversidade metabólica (i.e., biológica). No tempo geológico, ciclos biogeoquímicos são responsáveis por alterar a química do oceano, da atmosfera e dos ecossistemas terrestres de tal forma que as etapas

limitantes dentro de ciclos-chave modificam o tempo e o modo de Evolução¹⁶ [tradução nossa].

A literatura de pesquisa em ensino de Química afirma a importância da abordagem de ciclos biogeoquímicos na educação, de forma geral¹⁷:

Todos os maiores documentos de Educação Ambiental (EE) e Educação para o Desenvolvimento Sustentável (ESD) e Conferências Internacionais desde Tbilisi em 1977 [...] até Nagoya em 2014 [...] reconhecem explicitamente ou implicitamente a importância do conhecimento e entendimento dos princípios ecológicos gerais e ciclos biogeoquímicos para a compreensão das interligações com padrões de produção e consumo, assim como com os problemas ambientais resultantes, as suas causas e soluções, em níveis local e global¹⁷ [tradução nossa].

Ao se realizar o citado necessário e estratégico trabalho com o ensino de Química em perspectivas de pensamento sistêmico, com conceitos ligados ao Sistema Terra e a ciclos biogeoquímicos, uma possibilidade de abordagem é a utilização conjunta da experimentação pedagógica, tendo em vista a natureza da Química enquanto ciência, bem como as vantagens desse tipo de atividade didática, conforme será abordado no tópico seguinte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GARCIA-MARTINEZ, J. Chemistry 2030: A Roadmap for a New Decade. *Angewandte. Chemie International Edition*, Weinheim, v. 60, p. 4956–4960, 2021.
2. MAHAFFY, P. G.; HO, F. M.; HAACK, J. A. *et al.*; Can Chemistry Be a Central Science without Systems Thinking? *Journal of Chemical Education*, v. 96, n.12, p. 2679–2681, 2019.
3. ORGILL, M.; YORK, S; MACKELLAR, J. Introduction to Systems Thinking for the Chemistry Education Community. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 2720–2729, 2019.
4. SASTICE. <https://sastice.com/systems-thinking-in-chemistry-for-sustainability-toward-2030-and-beyond-stcs-2030/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
5. FLYNN, A. B.; ORGILL, M.; HO, F. M. *et al.* Future Directions for Systems Thinking in Chemistry Education: Putting the Pieces Together. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 3000, 2019.
6. MAHAFFY, P. G.; KRIEF, A.; HOPF, H. *et al.* Reorienting chemistry education through systems thinking. *Nature Reviews Chemistry*, v. 2, artigo 0126, 2018.
7. IUPAC. <https://iupac.org/project/2020-014-3-050/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
8. TALANQUER, V.; SZOZDA, A. R. An Educational Framework for Teaching Chemistry Using a Systems Thinking Approach. *Journal of Chemical Education*, v. 101, n. 5, p. 1785–1792, 2024.
9. ORION, N. The future challenge of Earth science education research. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, v. 1, n. 3, 2019.
10. STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J. *et al.* The emergence and evolution of Earth System Science. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 1, p. 54–63, 2020.
11. WISSINGER, J. E.; VISA, A.; SAHA, B. B. *et al.* Integrating Sustainability into Learning in Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 98, n. 4, p. 1061–1063, 2021.
12. KORNFELD, J.; STOKOE, S. Introducing Chemistry through the Lens of Earth’s Systems: What Role Can Systems Thinking Play in Developing Chemically and Environmentally Literate Citizens? *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 2910–2917, 2019.
13. GREENWOOD, T.; BAINBRIDGE, L.; PRYOR, K. *et al.* *Biozone Chemistry in the Earth System*. 1 ed. BIOZONE International Ltda. 264 p, 2019.
14. CHEN, W-Q.; GRAEDEL, T. E. Anthropogenic cycles of the elements: a critical review. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 16, p. 8574-8586, 2012.
15. RAFFERTY, J. P. Biogeochemical cycle. In *Britannica, Science*, 2022.
16. FALKOWSKI, P. G. Biogeochemical Cycles, Editor: Simon A Levin, *Encyclopedia of Biodiversity* (Second Edition), Academic Press, p. 552-564, 2001.
17. KOUTALIDI, S.; SCOULLOS, M. Biogeochemical cycles for combining Chemical knowledge and ESD issues in Greek secondary schools part I: designing the didactic materials. *Chemical Education Research and Practice*, v. 17, p. 10-23, 2016.
18. COOPER, M. M.; STOWE, R. L. Chemistry Education Research – From Personal Empiricism to Evidence, Theory, and Informed Practice. *Chemical Reviews*, v. 118, n. 12, p. 6053–6087, 2018.
19. FOWLER, W. C.; TING, J. M.; MENG, S. *et al.* Integrating Systems Thinking into Teaching Emerging Technologies. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 12, p. 2805–2813, 2019.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO SOBRE A CONCEPÇÃO DE ATIVIDADES EXPERIMENTAIS NO ENSINO DE QUÍMICA

CAIO PALLA MARQUES¹

¹Docente da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

Palavras-chave: Experimentação no Ensino; Educação Química; Teoria e Experimentação.



10.59290/978-65-6029-289-5.2

INTRODUÇÃO

A experimentação pedagógica pode ser entendida como uma atividade que proporciona a articulação entre fenômenos e teorias. Conforme a literatura¹, argumenta-se que a experimentação no ensino de Química não se restringe à manipulação de substâncias e materiais, apontando para uma ampliação da noção de atividades experimentais no ensino de Química em suas diferentes sugestões¹:

1) Atividades Demonstrativas-Investigativas; 2) Experiências Investigativas; 3) Simulações em Computadores; 4) Vídeos e Filmes; 5) Horta na Escola; 6) Visitas Planejadas; 7) Estudos de Espaços Sociais e Resgate de Saberes Populares¹.

Essa noção mais ampla do que são atividades experimentais no ensino está de acordo com os PCNEM na área de Química²:

[...] os dados obtidos em demonstrações, em visitas, em relatos de experimentos ou no laboratório devem permitir, através de trabalho em grupo e discussões coletivas, que se construam conceitos e se desenvolvam competências e habilidades. Deve ficar claro aqui que a experimentação na escola média tem função pedagógica, diferentemente da experiência conduzida pelo cientista. A experimentação formal em laboratórios didáticos, por si só, não soluciona o problema de ensino-aprendizagem em Química. As atividades experimentais podem ser realizadas na sala de aula, por demonstração, em visitas e por outras modalidades².

Importância da Experimentação no Ensino da Química

A importância da utilização da experimentação no ensino de Química é mencionada em inúmeros documentos oficiais²⁻⁴ e por distintos autores^{5,7}. A experimentação pode ser entendida como sendo “um dos principais alicerces que sustentam a complexa rede conceitual que estrutura o ensino de Química”⁵.

Em consonância ao que foi citado, há também, na literatura, a afirmação de que a experimentação pedagógica é “geralmente apontada como um importante recurso no desenvolvimento de saberes conceituais, procedimentais e atitudinais”^{8,9}.

Além, e decorrente, da importância do uso da experimentação no ensino de Química, nos diversos níveis de escolaridade, há a importância da pesquisa em experimentação no ensino de Química, que também contribui com avanços no uso da experimentação em sala de aula⁶:

Tomar a experimentação como parte de um processo pleno de investigação é uma necessidade, reconhecida entre aqueles que pensam e fazem o ensino de Ciências, pois a formação do pensamento e das atitudes do sujeito deve se dar, preferencialmente, nos entremeios de atividades investigativas⁶.

Por conseguinte, são tratadas as questões necessárias a serem analisadas quando o assunto é experimentação no ensino de Química: i) a frequência com que são realizadas atividades experimentais nos diversos contextos de tal ensino; ii) os obstáculos à realização de tais atividades; e, mais adiante, iii) como a experimentação pedagógica pode ser utilizada, ou seja, como se pode conceber abordagens e estratégias, bem como como as teorias de ensino citadas se refletem na concepção dessas atividades experimentais pedagógicas em Química⁶.

Experimentação Pedagógica: Utilização

Apesar da importância da utilização da experimentação pedagógica, é relatada a atual baixa utilização da experimentação em Química no ensino básico brasileiro^{5,10}:

Apesar de todos os esforços, a experimentação nas aulas de Ciências e de Química ainda é muito mais rara do que o desejável. Em visitas a escolas, contatos com professores e consultas a alunos concluintes do ensino médio, é possível verificar tal fato. Há escolas em que o espaço do laboratório foi transformado em sala de aula ou depósito⁵.

Um dos problemas relacionados à qualidade do Ensino de Ciências é a ausência de experimentação, uma vez que há inúmeros “obstáculos à inserção da experimentação no ensino”²⁰, como fatores relacionados à infraestrutura, grade curricular, fatores logísticos para tais atividades e falta de material bibliográfico que contemple, de forma explícita, a relação teoria-experimento. Esse fato também é abordado por outros autores^{9,10}:

[...] apesar da pesquisa sobre essa temática revelar diferentes tendências e modalidades para o uso da experimentação, essa diversidade, ainda pouco analisada e discutida, não se explicita nos materiais de apoio aos professores. Ao contrário do desejável, a maioria dos manuais de apoio ou livros didáticos disponíveis para auxílio do trabalho dos professores consiste ainda de orientações do tipo “livro de receitas”, associadas fortemente a uma abordagem tradicional de ensino^{9,10} [...].

Em consonância com esses apontamentos¹¹, também é mencionado na literatura que:

- i) as atividades experimentais são quase ausentes no ensino básico brasileiro, e “isso seria um problema a ser enfrentado, sobretudo, por meio de propostas catalisadoras de sua inserção em sala de aula”; mas no ensino superior as atividades experimentais estão bem presentes, porém
- ii) “nem sempre os estudantes conseguem se apropriar dos conhecimentos desenvolvidos nos experimentos, e isso contribui para tornar a experimentação uma área de investigação no ensino de Ciências”¹¹.

Como outro obstáculo à realização da experimentação no ensino de Química, há autores⁸ que advertem sobre a necessidade de se ampliar o conhecimento dos professores sobre experimentação, superando visões simplistas sobre tal atividade. Sobre essa questão, a literatura também menciona que⁵:

Há professores que não se sentem seguros para realizar aulas práticas, muitas vezes alegando indisciplina dos alunos; há professores com carga excessiva de trabalho, sem tempo para preparar as aulas práticas e sem que possam contar com técnicos que os auxiliem; há também professores que têm medo de que algo aconteça com algum aluno e que eles tenham que responder judicialmente a algum processo⁵.

É também ressaltado que docentes, por vezes, desconhecem muitas das possíveis contribuições e abordagens das atividades experimentais para o ensino de Ciências ou têm visões equivocadas sobre suas finalidades no contexto escolar⁹.

No contexto citado, visando avanços na experimentação pedagógica no ensino de Ciências e de Química, é ressaltado⁹ que é preciso analisar “qual realmente é o papel das atividades experimentais, quais as formas de abordá-las em sala de aula e quais as estratégias que favoreçam sua aplicação”⁹.

Nesse sentido, o próximo tópico se aprofundará nessa reflexão e tratará do papel das atividades experimentais no ensino de Química, seus objetivos e contribuições.

Objetivos e Contribuições das Atividades Experimentais no Ensino de Química

Para se avançar em respostas sobre os objetivos da experimentação no ensino de Química e, como será visto mais adiante, em formas de abordar e estratégias para o uso da experimentação pedagógica, os PCNEM² reportam que atividades de experimentação no ensino de Química possibilitam, conforme o **Quadro 2.1**:

Quadro 2.1 Objetivos da Experimentação no Ensino de Química segundo três fontes bibliográficas distintas

AE no EQ possibilitam ²	Professores apontam motivos para AE ¹²	Contribuições de AE para o EQ ⁹
Entender e aplicar métodos próprios das Ciências Naturais	Estimular a observação acurada	Compreender a natureza da ciência e papel do cientista em uma investigação
Formular hipóteses e prever resultados	Promover métodos de pensamento científico e de senso comum	Desenvolver a iniciativa pessoal e a tomada de decisão
Produzir textos adequados para relatar experiências, dúvidas e conclusões	Registro cuidadoso dos fatos	Aprimorar a capacidade de observação e registro de informações
Desenvolver a capacidade de comunicação	Desenvolver Habilidades Manipulativas	Aprimorar habilidades manipulativas
Elaborar estratégias de enfrentamento de questões	Treinar em resoluções de problemas	Aprender a analisar dados e propor hipóteses
Utilizar instrumentos de medição e de cálculo	Adaptar as exigências da escola	Estimular a criatividade
Interpretar e criticar resultados em experimentos	Esclarecer a teoria e promover a sua compreensão	Detectar e corrigir erros conceituais dos alunos

–	Verificar fatos e princípios estudados	Aprender conceitos científicos
Desenvolver modelos explicativos para sistemas tecnológicos e naturais	Vivenciar a aprendizagem por investigação	Desenvolver a capacidade de trabalhar em grupo
–	Motivar e manter o interesse na matéria	Motivar e despertar a atenção do aluno
Articular ciência e tecnologia de forma interdisciplinar	Tornar os fenômenos mais reais por meio de AE	Compreender as relações CTS

Legenda: AE = atividades experimentais; EQ = ensino de Química.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em: BRASIL, p. 12-13, 1999; HODSON, 1998; OLIVEIRA, p. 139-152, 2010.

Sobre os objetivos das atividades experimentais no ensino de Química, na mesma linha do que foi citado sobre os tipos de saberes trabalhados em atividades experimentais, a literatura também aponta que⁹:

Segundo Carvalho e colaboradores (2005), os fatos e os conceitos se constituem em apenas um dos conteúdos a serem trabalhados e – tão importante quanto – outros tipos de saberes (conceitual, procedimental e atitudinal) também podem ser favorecidos⁹.

Já com respeito à finalidade da experimentação no ensino de Ciências, é citado que¹:

Ela permite, por sua estrutura dinâmica, a formação e o desenvolvimento do pensamento analítico, teoricamente orientado, o que possibilita a fragmentação de um fenômeno em partes, o reconhecimento destas e a sua recombinação de um modo novo. É nisso que reside o seu grande potencial como atividade imaginativa e criadora, se bem empregada¹.

Outro aspecto fundamental, rumo a um maior entendimento sobre as concepções de atividades experimentais no ensino de Química, é identificar que tipos de abordagens e estratégias têm sido relatados na literatura ao se trabalhar com atividades experimentais pedagógicas. Esse ponto é apresentado no próximo tópico.

Experimentação Investigativa e o Ensino de Química

Em atividades investigativas, busca-se resolver questões através de experimentos¹³:

Inquiry-based learning é centrado no aluno e envolve o instrutor fazendo perguntas em vez de apresentar fatos. O objetivo é que, à medida que os estudantes se esforçam para responder às questões, eles caminhem em direção à apropriação de sua própria aprendizagem¹³.

A atividade investigativa pode ser feita em etapas^{19,21}: i) proposição de um problema, através da formulação de uma pergunta que estimule os estudantes; ii) identificação e exploração das ideias dos estudantes: o professor estimula os alunos a desenvolverem hipóteses solucionadoras do problema inicial, principalmente as hipóteses passíveis de experimentação com as condições disponíveis, bem como o professor analisa, discute e trabalha coletivamente no sentido de, caso necessário, reelaborar ideias dos alunos; iii) o professor pede um plano de ações experimentais para os alunos, de forma a se testar as hipóteses previamente elaboradas; iv) o professor orienta, estimula e supervisiona o experimento, para que haja uma coleta de dados organizada e bem registrada; v) os alunos são orientados a expor os dados em tabelas e gráficos e a interpretá-los, realizando-se generalizações possíveis e com linguagem científica, articulando teoria e prática experimental; vi) os alunos respondem à questão inicial e analisam a validade das hipóteses elaboradas, bem como métodos e implicações decorrentes de tais hipóteses.

Por trabalhar as três categorias de conteúdos procedimentais, e pelos outros aspectos previamente e adiante discutidos, a experimentação investigativa¹⁵:

Exige habilidades cognitivas de alta ordem, como análise, síntese e avaliação, uma vez que o estudante deve planejar toda a experimentação, inclusive a escolha do sistema a ser investigado¹⁵.

No contexto de uma alfabetização científica que “pretende aproximar o estudante do modo de produção da ciência, não resumindo, portanto, a educação ao processo de aquisição

de conceitos científicos”¹⁶, “atividades experimentais investigativas são elaboradas com o objetivo de promover condições para que os alunos consigam elaborar conceitos e desenvolver habilidades de raciocínio”¹⁶.

É mencionado também na literatura sobre a contemplação de características das teorias científicas para o desenvolvimento de atividades experimentais investigativas no ensino de Química¹:

A capacidade de generalização e de previsão de uma teoria é que pode dar à experimentação no ensino um caráter investigativo. Então, um experimento simples, em que haja um roteiro contendo apenas materiais e procedimentos, pode ser transformado numa atividade investigativa se o professor conseguir inserir atividades outras que contemplem generalizações e previsões¹ [...].

De acordo com as etapas propostas para atividades experimentais pedagógicas com abordagem investigativa, e de acordo com a inserção da contemplação das características de teorias científicas também citadas, além de outras habilidades que podem ser trabalhadas na atividade, a abordagem investigativa pode proporcionar ao aluno o conhecimento das etapas do trabalho do cientista, o que¹⁶:

Pode contribuir para a formação do espírito científico. Assim, o estudante, baseando-se em evidências, pode elaborar hipóteses para explicar qualquer fenômeno químico ou social que o rodeie. A questão da validação das hipóteses e da discussão coletiva pode trabalhar a importância de não se aceitar tudo rapidamente, sem um questionamento prévio. Como diz Bachelard (1996), o espírito científico sabe, acima de tudo, formular perguntas¹⁶.

Outro aspecto, neste contexto é que o método investigativo no ensino¹⁶:

Remete à participação ativa da construção do conhecimento, em estreita afinidade com as teorias construtivistas para a educação. Por isso, também é reconhecido como um processo investigativo de ensino, quando o aluno vai a campo para pesquisar e levantar dados para o estudo de um tema¹⁶.

Sobre a característica motivadora para a aprendizagem que as atividades experimentais investigativas podem proporcionar, podemos pensar que¹⁶:

O exercício do indivíduo, ao realizar a atividade intelectual de busca pelo conhecimento, leva ao gosto do saber pelo próprio conhecimento, sentindo satisfação pelos desafios propiciados pelos “problemas difíceis”: (...) Para Charlot (2005), essa satisfação com o conhecimento é um dos pontos-chave que levam os estudantes a aprenderem (ou não). A relação com o saber é definida pelo autor como o conjunto de relações que um sujeito estabelece com uma atividade, uma situação, uma pessoa, conectados de alguma maneira ao aprender e ao saber, guardando, por sua vez, uma relação com a linguagem, com o mundo e consigo mesmos¹⁶.

Do que foi mencionado, e a partir de uma leitura mais detalhada do PCNEM² e de outros documentos da educação nacional^{3,4} nota-se uma relevância na preparação do professor para se trabalhar com as potencialidades citadas na linha de experimentação investigativa, a qual promove, dentre outros aspectos positivos, um estímulo à participação do estudante²¹ e, como consequência, uma melhora na aprendizagem.

Neste sentido, além dos trabalhos citados, têm sido relatadas experiências nesta linha de experimentação no ensino de Química em distintos contextos, como: na formação inicial de professores, na formação de professores em Ciências no ensino à distância¹⁷ em aulas presenciais de Química no ensino médio, dentre outros contextos educacionais, como a busca pela compreensão do potencial metacognitivo do diálogo neste tipo de atividade.

Como exemplos de atividades experimentais investigativas relatadas¹², há o registro de resultados de uma atividade experimental investigativa do tipo “aberta”, em nível superior, utilizando investigações com CO₂, tendo em vista a segurança e simplicidade de sistemas envolvendo esta substância. É relatado também uma atividade investigativa experimental para abordar, dentre outros aspectos, os resultados de espectroscopia de emissão do elemento Hidrogênio, bem como a influência dos trabalhos de Balmer e de Rydberg no desenvolvimento do modelo atômico de Bohr¹⁹⁻²¹.

Este tópico, por ser um conteúdo fundamental para Químicos e Físicos, e por ser de estudo interessante para o desenvolvimento do entendimento sobre a construção destas ciências, tem merecido a atenção de diversos pesquisadores no desenvolvimento de atividades experimentais pedagógicas. Ambas as atividades citadas¹⁹⁻²¹ possuem como vantagens o estímulo ao raciocínio do aluno na elaboração de perguntas e na construção de experimentos para responder a tais perguntas científicas.

Como desvantagens, tais atividades exigem do professor uma formação e planejamento mais avançados, e do aluno um engajamento maior no trabalho teórico e experimental, bem como na elaboração de ideias. Além do maior trabalho da cognição do aluno, a abordagem investigativa pode ter também outra vantagem: aproximar mais o aluno do que se entende como sendo a natureza do método científico e da produção intelectual, de forma geral.

Sobre as abordagens apresentadas acima, é interessante notar que⁹:

Para alguns pesquisadores, as aulas experimentais nas escolas devem partir de uma abordagem mais simples e fechada (como nas atividades de demonstração e verificação), na qual os alunos possam entrar em contato com experimentos fáceis. À medida que fossem se familiarizando com essa estratégia de ensino, poderiam realizar experimentos mais abertos, como, por exemplo, as atividades de investigação⁹.

Assim, caracteriza-se o potencial da utilização da experimentação pedagógica no ensino de Química, que pode ser realizada através de materiais acessíveis, utilizando-se o sistema carbonato para se trabalhar distintos tópicos e conceitos no ensino da disciplina. Também pode servir para desenvolver habilidades que a experimentação investigativa pode oferecer como vantagem.

Dessa forma, os próximos tópicos tratam do sistema carbonato e de sua utilização no ensino de Química, bem como de possibilidades de contextualização utilizando ciclos biogeoquímicos e o Sistema Terra em uma perspectiva de pensamento sistêmico. Isso pode ser feito, por exemplo, abordando-se a oceanografia química para trabalhar conceitos químicos no ensino, em conjunto com a experimentação pedagógica utilizando águas minerais gaseificadas (carbonatadas), que são acessíveis e podem ser utilizadas em ambientes pedagógicos diversos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SILVA, R. R.; MACHADO, P. F. L.; TUNES, E. Experimentar sem medo de errar. IN: SANTOS, W. L. P.; MALDANER, O. A. Ensino de Química em foco. 1. ed. Ijuí-RS: Editora Unijuí, 2010.
2. BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. Brasília: MEC/SEMTEC, 1999.
3. BRASIL. MEC, SEB. Orientações Curriculares para o Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, v. 2, p. 135 : MEC, SEB, 2006.
4. BRASIL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC, SEMTEC, 2002.
5. LISBÔA, J. C. F. QNEsc e a Seção Experimentação no Ensino de Química. QNEsc., v. 37, n. 2, p. 198-202, 2015.
6. GIORDAN, M. O Papel da Experimentação no Ensino de Ciências. QNEsc., v. 10, p. 43-49, 1999.
7. MORI, R. C. Análise de experimentos que envolvem Química presentes nos livros didáticos de Ciências de 1ª a 4ª séries do ensino fundamental, avaliados no PNLD/2007. 2009. 202 p. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
8. GALIAZZI, M. C.; DE BARROS ROCHA, J. M.; SCHMITZ, L. C. *et al.* Objetivos das Atividades Experimentais no Ensino Médio: A Pesquisa Coletiva como Modo de Formação de Professores de Ciências. Ciência & Educação, v. 7, n. 2, p. 249-263, 2001.
9. OLIVEIRA, J. R. S. Contribuições e abordagens das atividades experimentais no ensino de ciências: reunindo elementos para a prática docente. Acta Scientiae, v. 12, n. 1, p. 139-153, 2010.
10. ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, n. 2, p. 176-194, 2003.
11. GONÇALVES, F. P.; MARQUES, C. A. Contribuições pedagógicas e epistemológicas em textos de experimentação no ensino de Química. Investigações em Ensino de Ciências, v. 11, n. 2, 2006.
12. HODSON, D. Ensino de ciências: conteúdo, contexto e motivação. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1998.
13. STOUT, R. P. CO₂ Investigations: An Open Inquiry Experiment for General Chemistry. Journal of Chemical Education, v. 93, n. 4, p. 713-717, 2016.
14. FERREIRA, L. H.; HARTWING, D. R.; OLIVEIRA, R. C. Ensino Experimental de Química: Uma Abordagem Investigativa Contextualizada. Química Nova na Escola (Impresso), v. 32, p. 101-106, 2010.
15. SIMONI, D. A.; DE ANDRADE, J. C.; SIMONI, J. A. Montagem de uma disciplina experimental: Contribuição para a Química Geral. Química Nova, v. 34, n. 10, p. 1818-1824, 2011.
16. KASSEBOEHMER, A. C.; FERREIRA, L. H. O método investigativo em aulas teóricas de Química envolvendo a separação de gases atmosféricos. Enseñanza de las Ciencias, v. extra, p. 1822-1826, 2013.
17. HECKLER, V.; MOTTA, C. S.; GALIAZZI, M. C. A Experimentação no Contexto Brasileiro da Formação de Professores em Ciências na EAD em foco. Revista Científica em Educação a Distância, v. 5, n. 2, p. 102-123, 2015.

18. ROCHA, M. A influência da atividade experimental na aprendizagem potencialmente significativa de soluções químicas para alunos do ensino médio, 2018. DISSERTAÇÃO (Mestrado em Ensino) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.
19. RITTENHOUSE, R. C. Understanding Atomic Structure: Is There a More Direct and Compelling Connection between Atomic Line Spectra and the Quantization of an Atom's Energy? *Journal of Chemical Education*, v. 92, n. 6, p. 1035-1039, 2015.
20. SALA, O. Uma introdução à espectroscopia atômica – o átomo de hidrogênio. *Química Nova*, v. 30, n. 7, p. 1773-1775, 2007.
21. BOPEGEDERA, A. M. R. P. A Guided-Inquiry Lab for the Analysis of the Balmer Series of the Hydrogen Atomic Spectrum. *Journal of Chemical Education*, v, 88, n. 1, p. 77-81, 2011.

CAPÍTULO 3

CICLO DO CARBONO, SISTEMA CARBONATO E O CONTEXTO OCEÂNICO

CAIO PALLA MARQUES¹
GILDO GIROTTI JÚNIOR²

¹Docente da Universidade Federal de Rondônia (UNIR).

²Docente da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Palavras-chave: Ciclo do Carbono; Ensino; Biogeoquímica.



10.59290/978-65-6029-289-5.3

INTRODUÇÃO

Considerando a ubiquidade do Sistema Carbonato na natureza e a sua vasta utilização em contextos pedagógicos, o presente trabalho busca introduzir e esclarecer aspectos químicos, bem como discutir correlações conceituais que podem ser feitas acerca desse sistema em abordagens didáticas.

Tendo em vista a importância ambiental central do sistema carbonato para os ecossistemas oceânicos, e destes para a dinâmica energética do planeta, o presente trabalho introduz esse sistema no contexto do ciclo do carbono, de forma a contribuir para a busca de abordagens nas quais ele pode ser trabalhado para o ensino de Química de maneira contextualizada.

A água e o CO_2 são substâncias que permeiam os seres vivos e os processos bióticos, bem como a biosfera¹⁻³. Tais substâncias compõem o Sistema Carbonato (SC), também denominado sistema $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, constituído, em meio aquoso, pelos componentes CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- e CO_3^{2-} (carbono inorgânico dissolvido)¹⁻²¹.

O Sistema Carbonato (SC) é extensamente utilizado em atividades pedagógicas no ensino de Química, em diversos conteúdos. Como exemplos, podem ser citados: soluções e a lei de Henry²¹⁻²³, cinética química²⁴⁻²⁷, estado gasoso e estequiometria de reações com a formação de gás²⁸⁻³³, tópicos de química analítica^{34,36}, físico-química³⁷, e equilíbrio químico³⁸⁻⁴⁷.

Há, portanto, vastas possibilidades de contextualização ao se trabalhar o ensino utilizando o referido sistema⁴¹⁻⁴⁶, incluindo, por exemplo, o uso de bebidas carbonatadas^{22,23,48-84}.

O **Quadro 3.1** expõe temas e tópicos relacionados ao SC ou ao CO_2 em livros técnico-científicos em nível superior.

Quadro 3.1 Tópicos onde é abordado o sistema carbonato ou o dióxido de carbono em livros técnico-científicos

Tema ou Conteúdo	Referência 1	Referência 2	Referência 3	Referência 4	Outras Referências
Efeito estufa	BAIRD, p. 227-283, 2011.	ZUMDAHL e DECOSTE, p. 302, 2016.	KOTZ, p. 934-955, 2016.	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 1208, 2013.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 558, 2005.

EXPERIMENTAÇÃO PEDAGÓGICA
E O SISTEMA CARBONATO

Biocombustíveis	KOTZ, p. 951-953, 2016.	BAIRD, p. 356-367, 2011.	MANAHAN, p. 655, 2013.	BAIRD, p. 356, 2011.	—
Cimento	KOTZ, p. 999, 2016.	HARRIS, p. 268, 2017	CHANG e GOLDSBY, p. 928, 2013.	BAIRD, p. 243, 2011.	—
Emissão de CO ₂ e oceanos	KOTZ, p. 19, 956-960, 2016.	LEWIS e EVANS, p. 229, 2014.	HARRIS, p. 1, 234-161, 2017.	—	—
Fotossíntese	CHANG e GOLDSBY, p. 32, 228, 268, 325, 402, 664, 2013.	LEWIS e EVANS, p. 89, 296, 2014.	HARRIS, p. 3, 2017.	KOTZ, p. 930, 2016.	LEE, p. 213, 1999.
Metabolismo (M) ou tampão fisiológico (T)	CHANG e GOLDSBY, p. 217, 926, 1044, (M), 2013.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 256, 818, (T), 2005.	LEWIS e EVANS, p. 228, (T), 2014.	BURROWS <i>et. al.</i> p. 281, (T), 2016	—
Ciclo do carbono	KOTZ, p. 933, 2016.	LEE, p. 214-215, 1999.	CHANG e GOLDSBY, p. 589, 2013.	MANAHAN, p. 30-31, 2013.	—
Combustão	LEWIS e EVANS, p. 329, 2014.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 142, 2005.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 254, 2005.	LEE, p. 213, 1999.	—
Reforma e outras reações	LEWIS e EVANS, p. 328, 2014.	KALBUS <i>et. al.</i> , 2004.	—	—	—
Captura de CO ₂	ZUMDAHL e DECOSTE, p. 365, 2016.	CHANG e GOLDSBY, p. 164, 168, 195, 2013.	TICICH, 2011.	LEE, p. 213, 1999.	KOTZ, p. 958, 2016.
Sublimação de fases do CO ₂	CHANG e GOLDSBY, p. 506, 967, 2013.	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 816-817, 2013.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 503, 499, 2005.	LEWIS e EVANS, p. 152, 2014.	LEE, p. 214, 1999.

EXPERIMENTAÇÃO PEDAGÓGICA
E O SISTEMA CARBONATO

Bebida Carbonatada ou efervescente	ZUMDAHL e DECOSTE, p. 504, 2016.	LEWIS e EVANS, p. 229, 324, 2014.	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 540-541.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 1010, 2005.	LEE, p. 213, 1999.
CO ₂ supercrítico	KOTZ, p. 521-522, 562-563, 2016.	BAIRD, p. 141, 247, 2011.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 360, 2005.	LEWIS e EVANS, p. 128, 2014.	CHANG e GOLDSBY, p. 502, 2013.
Estrutura molecular de CO ₂	ZUMDAHL e DECOSTE, p. 365, 378, 2016.	EBBING e GAMMON, p. 291, 2017.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 341, 406, 2005.	KOTZ, p. 379, 383.	—
Termodinâmica	KOTZ, p. 249, 2016.	CHANG e GOLDSBY, p. 256, 258, 2013.	LEWIS e EVANS, p. 173, 2014.	—	—
Gases ou densidade e massa molar de gases	KOTZ, p. 466, 482, 2016.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 438, 2005.	CHANG e GOLDSBY, p. 190, 2013.	—	—
Reações ácido-base e CO ₂	MOORE <i>et. al.</i> , p. 765, 552, 2005.	EBBING e GAMMON, p. 121, 2017,	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 691, 963, 2013.	KOTZ, p. 754, 956, 2016.	
Lei de Henry e CO ₂	KOTZ, p. 586, 2016.	CHANG e GOLDSBY, p. 553, 559, 2013.	LEWIS e EVANS, p. 139-141, 2014.	MANAHAN, p. 65, 2013.	BAIRD, p. 601, 2011.
CO ₂ e água doce	EBING e GAMMON, p. 554, 2017.	HARRIS, p. 138, 161, 2017.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 836, 2005.		—
Estalactite e Estalagmite	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 61, 2013.	LEWIS e EVANS, p. 150.		—	—
Preparo de alimentos	BUROOWS <i>et. al.</i> , p. 295, 2013.	CHANG e GOLDSBY, p. 110, 2013.	—	—	—

Óxidos do Carbono	BUROOWS <i>et. al.</i> , p. 1207, 2013.	CHANG e GOLDSBY, p. 967, 2013.	LEE, p. 214, 1999.	BURROWS <i>et. al.</i> , p. 962, 2013.	–
Química Inorgânica	MOORE <i>et. al.</i> , p. 1068, 2005.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 91, 2005.		–	–
Água dura	MOORE <i>et. al.</i> , 2005, p. 172.	HARRIS, p. 268, 2017.	BAIRD, p. 607-611, 2011.	MANAHAN, p. 247-248, 2013.	–
Precipitação/ Decomposição de CaCO ₃	CHANG e GOLDSBY, p. 126, 762, 949, 2013.	EBIING e GAMMON, 3p. 752, 2017.	LEE, p. 213-215, 1999.	MOORE <i>et. al.</i> , p. 172, 2005.	LEWIS e EVANS, p. 99, 76, 2014.
¹⁴ C, CO ₂	MOORE <i>et. al.</i> , p. 980, 2005.	–	–	–	–
Estequiometria	MOORE <i>et. al.</i> , p. 104, 2005.	LEWIS e EVANS, p. 99, 2014.	–	–	–

Fonte: Autoria própria (MARQUES, C. P., 2025).

Em termos contextuais ambientais, o SC está no cerne da componente oceânica do ciclo biogeoquímico do carbono. Trata-se de um elemento central para a compreensão de fenômenos relacionados às ciências climáticas, bem como à dinâmica da matéria e da energia no planeta, em sentido amplo.

O Sistema Carbonato e as Águas Minerais

Ao químico Joseph Priestley é creditada a invenção da água adicionada de CO₂ (água carbonatada), em 1767⁸⁵⁻⁸⁸. A descoberta de Priestley, juntamente com estudos prévios e posteriores sobre o CO₂ e sua dissolução em água, realizados por Van Helmont, Joseph Black, Henry Cavendish e Antoine L. Lavoisier (em ordem cronológica)⁸⁹⁻⁹¹, contribuiu para a origem da indústria de bebidas carbonatadas⁹².

Em termos de propriedades biológicas possíveis de serem trabalhadas no ensino, no contexto do SC, a sensação de realce de sabor causada pela bebida carbonatada envolve distintos fatores físico-químicos em interação com os receptores do paladar. Entre eles, destaca-se a ação catalítica enzimática da anidrase carbônica salivar em componentes do SC⁹³, que é o principal tampão nos seres vivos, sendo o ânion bicarbonato o íon de maior concentração molar intracelular⁹⁴.

Essa enzima, em conjunto com outros sistemas bioquímicos, está ligada à homeostase ácido-base nos seres vivos. Esse processo envolve o transporte com troca iônica de bicarbonato nos eritrócitos, bem como a conversão enzimática de bicarbonato em CO₂, seguida da degaseificação pela via pulmonar. Nesse contexto, podem ser trabalhados conceitos relacionados ao equilíbrio químico em meios homogêneos e heterogêneos, especialmente em atividades pedagógicas no ensino superior⁹⁵.

Outra propriedade biológica conhecida e útil da carbonatação de bebidas é a sua capacidade de reduzir ou limitar a quantidade de micro-organismos, devido ao pH característico desse tipo de bebida⁹⁶.

Introdução à Química do Sistema Carbonato

O processo industrial de adição de CO₂ em água é realizado em duas etapas. A primeira consiste na adição do gás em água a temperaturas entre 4 e 8 °C, com o objetivo de favorecer a sua solubilização no líquido⁴⁸.

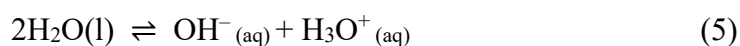
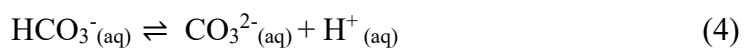
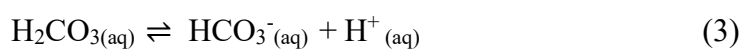
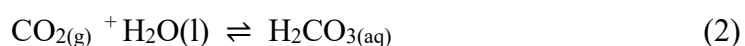
No final do processo, no envasamento, mais CO₂ é adicionado com a finalidade de aumentar a pressão parcial do gás e, com isso, a sua solubilidade no meio aquoso⁴⁸.

Nas AMC (água mineral carbonada) estão presentes os já citados componentes do SC, que podem ser compreendidos em termos dos equilíbrios consecutivos expostos nas Equações 1 a 5¹⁻²¹, exemplificados na **Tabela 3.1**^{3,61}, cujo perfil de fração de espécies em função do pH está representado na **Figura 3.1**⁹⁷ e **Figura 3.2**.

A Equação 1 representa a dissolução do CO₂ em água, cuja constante de equilíbrio é a constante de Henry (H), relatada com o valor de 0,0334 (a 25 °C)². Nesse caso, a concentração de CO₂ dissolvido em água (CO_{2(aq)}) no equilíbrio é expressa em mol/L, e a pressão parcial de equilíbrio do CO₂ gasoso acima do líquido (CO_{2(g)}) é expressa em atmosferas. Escrevendo-

se a expressão de equilíbrio da Equação 1 e utilizando-se a constante de Henry, pode-se estimar a concentração de CO₂ dissolvido em um líquido em equilíbrio com uma pressão parcial de CO₂ gasoso em interface com o líquido.

Figura 3.1 Equações químicas de equilíbrio do sistema carbonato, a 25°C¹⁻³



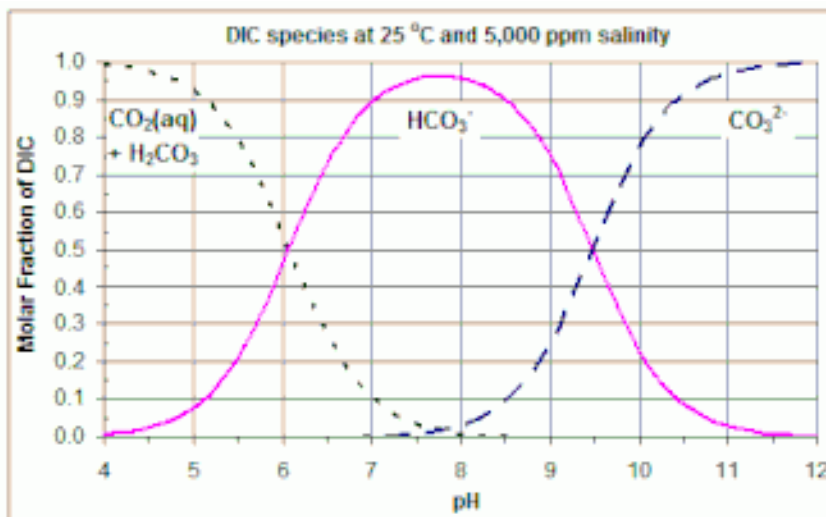
Legenda: A) dissolução do CO₂ gasoso em água, formando CO₂ hidratado (CO_{2(aq)}); B) equilíbrio de formação do ácido carbônico (H₂CO₃), a partir da reação entre CO_{2(aq)} e água; C) e D) primeira e segunda dissociações ácido-base do H₂CO₃. **Fonte:** BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

Tabela 3.1 Exemplo de estimativa de concentrações molares de equilíbrio de espécies do sistema carbonato, em uma mistura de água a 298,15 K e 3,0 atm de CO₂

Espécie	Molaridade mol. L ⁻¹
CO _{2(g)}	0,123
CO _{2(aq)}	0,103
H ₂ CO _{3(aq)}	0,00009
H ⁺ _(aq)	0,00021
HCO ₃ ⁻ _(aq)	0,00021
CO ₃ ²⁻ _(aq)	4,6 . 10 ⁻¹¹

Fonte: Autoria própria, adaptado de HOWALD, 1999⁶¹ e de SHRIVER e ATKINS, 2008³.

Figura 3.2 Diagrama “Bjerrum plot”. Eixo das ordenadas: fração molar das espécies do sistema carbonato (DIC – *dissolved inorganic carbon*) em função do pH (eixo das abscissas)

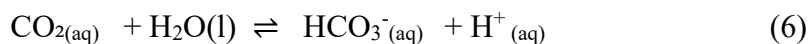


Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Bjerrum_plot⁹⁷. Acesso em: 08 set. 2025.

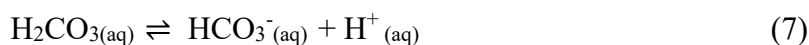
As Equações 2 e 3 apresentam uma abordagem menos frequente, em que a primeira ionização do ácido carbônico (H_2CO_3) é explicitada na literatura^{2,10,11,13,15}. Nessa descrição, considera-se inicialmente o equilíbrio de formação do $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$ (Equação 2), cuja constante de equilíbrio (K_f) é encontrada na literatura com valores entre $1,7 \cdot 10^{-3}$ e $2,8 \cdot 10^{-3}$, a 25°C ^{10,13}. Quando se explicita a K_f do $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$, a primeira constante de ionização do $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$ é relatada com valores que variam entre $1,5 \cdot 10^{-4}$ ¹⁰, ou $2,5 \cdot 10^{-4}$ ¹⁶, também a 25°C .

A primeira ionização ácida do SC é, no entanto, mais comumente apresentada na literatura por meio de uma abordagem mais concisa¹⁰, escrita na Equação 6. Essa equação resulta da combinação das Figuras Equações 3.1, conduzindo a uma constante de acidez de aproximadamente $4,2 \cdot 10^{-7}$ ^{10,14-15} (**Figura 3.3**).

Figura 3.3 Equação do Sistema Carbonato



*



Fonte: BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

Sobre a questão da primeira ionização ácida do $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$, é também descrito que:

As soluções aquosas de CO_2 são apenas fracamente ácidas, mas isso não implica que o H_2CO_3 (ácido carbônico) seja um ácido muito fraco. O valor do $\text{pK}_{\text{a}(1)}$ para o H_2CO_3 geralmente é citado como 6,37. No entanto, essa avaliação supõe que todo o ácido esteja presente em solução na forma de H_2CO_3 ou HCO_3^- , quando, de fato, uma grande proporção está presente na forma de CO_2 dissolvido. Levando-se isso em conta, chega-se a um $\text{pK}_{\text{a}(1)}$ para o H_2CO_3 de $\approx 3,6$. Isto é consistente com um valor de $\text{pK}_{\text{a}} = 3,45 \pm 0,15$ relatado em 2009 a partir da protonação ultrarrápida do íon hidrogênio-carbonato”¹³.

Conforme relatado, “historicamente, o CO_2 tem sido frequentemente chamado de ácido carbônico, e o H_2CO_3 foi chamado de ácido do ar”¹⁵. Esse fato pode ter contribuído para a origem da complexidade terminológica que ocorre na literatura. Comumente, a Equação 6 aparece de outra forma, havendo a substituição da grafia $\text{CO}_{2(\text{aq})}$, pela grafia $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$ ^{*11}, o que gera uma adaptação da Equação 6, expressa neste trabalho pela Equação 7.

Nessa abordagem, a grafia $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}^*$ (Equação 7) representa a soma das concentrações de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ e $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$ ¹¹. Trata-se de uma convenção terminológica, considerando que, na faixa ácida de pH, a concentração de $\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$ é estimada corresponder a aproximadamente 0,3% dessa soma, a 25 °C¹⁰.

Outro motivo apontado na literatura para o uso da Equação 7 é que a expressão da ionização de um ácido ($\text{H}_2\text{CO}_{3(\text{aq})}$) dessa forma é mais familiar, no contexto de equilíbrio ácido-base diprótico, do que a Equação 6. Assim, há maior conveniência no uso da Equação 7 que, muitas vezes, aparece acompanhada de uma observação em livros sobre tal questão^{11,12}.

Essa dinâmica¹¹ gera o valor de pK_{a} igual a 6,37, obtido da constante de acidez expressa na Equação 6 (ou na Equação 7), denominado “ pK_{a} efetivo¹⁵” ou “ pK_{a} aparente¹⁶” da primeira ionização ácida do ácido carbônico^{2,13}. Esse aspecto pode ser observado no diagrama de distribuição de espécies do SC^{2,10}.

Com relação à segunda ionização do ácido carbônico (Equação 4), trata-se da segunda ionização de um ácido fraco, cuja constante de acidez é apresentada na literatura na faixa de

$4,8 \cdot 10^{-11}$,^{2,4,6,17-20}. Apesar de o foco do presente trabalho não envolver uma discussão detalhada da especiação do SC, a fundamentação exposta busca fornecer um entendimento da primeira dissociação ácida citada, que é a etapa relacionada ao pH de bebidas carbonatadas.

Em suma, quanto a essa etapa, ainda que haja ampla evidência experimental sustentando que o CO_2 pode ser considerado a espécie ácida que origina o íon bicarbonato em água — não havendo concentrações apreciáveis da espécie H_2CO_3 em meio aquoso ou gasoso na biosfera⁹⁸ —, o H_2CO_3 continua sendo utilizado em muitos livros-texto, em níveis médio e superior de escolaridade, por razões didáticas ou históricas, conforme discutido.

Diante do exposto, nota-se que propostas didáticas envolvendo o SC podem ser um caminho para a abordagem de conceitos básicos em equilíbrio ácido-base. Além disso, permitem tratar a complexidade descrita acerca do equilíbrio da primeira ionização do SC, contribuindo também para a experiência dos estudantes com a interpretação de conceitos apresentados em livros de apoio didático da área de Química.

Introdução à Lei de Henry no Contexto do SC e de Bebidas Carbonatadas

Além de equilíbrio ácido-base, outro conteúdo que pode ser trabalhado em contextos didáticos, com temáticas envolvendo o SC e utilizando bebidas carbonatadas como material de apoio pedagógico, é a solubilidade de gases em líquidos.

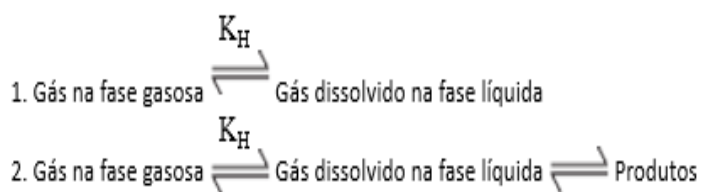
Para se abordar a dissolução do CO_2 em água, o estudo da Lei de Henry pode se mostrar como um caminho interessante. Um enunciado da Lei de Henry pode ser escrito da seguinte forma: “A concentração de equilíbrio de um gás dissolvido em um solvente líquido, a uma certa temperatura, é proporcional à pressão parcial do gás acima do líquido⁹⁹”. Esta lei pode ser expressa matematicamente como o quociente: $c / p = H$, onde H é a constante de Henry, c é a concentração de equilíbrio do gás (soluto) dissolvido no líquido e p é a pressão parcial de gás em equilíbrio com o líquido (solvente)⁹⁹.

A **Figura 3.4** representa o processo de solubilização de um gás em um líquido, que pode ocorrer ou não com reação química entre o gás (soluto) e o líquido (solvente)⁹⁹⁻¹⁰¹.

A reação química do soluto com o solvente explica a maior solubilização de alguns gases que reagem com a água. Isso justifica, junto com outros fatores, como polaridade e polarizabilidade, a maior solubilidade, no meio aquoso, de gases como CO_2 , NH_3 , HCl , F_2 ,

SO₂, H₂S e Cl₂, em comparação com a menor solubilidade de outros gases, como O₂, N₂, H₂, CO, CH₄ e os gases nobres⁹⁹⁻¹⁰¹.

Figura 3.4 Representação da solubilização de um gás em um líquido



Legenda: 1) Sem reação com o solvente líquido. 2) O gás reage com o solvente líquido. Em ambos os casos, a aplicação da lei de Henry pode ser escrita: $p / c = K_H$; c = concentração do gás (soluto) dissolvido na fase líquida; p = pressão parcial do gás na fase gasosa; K_H = constante de Henry^{75,76}.

Fonte: BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

A constante de Henry varia de acordo com a identidade do gás, com o meio solvente (identidade do solvente, força iônica, substâncias orgânicas dissolvidas) e com a temperatura⁹⁹⁻¹⁰¹. Sobre o escopo desta lei, suas relações termodinâmicas e aspectos históricos, há revisões na literatura^{99,102,103}.

Com relação ao sistema “água gaseificada com CO₂”, a Lei de Henry tem boa utilidade como uma aproximação para cálculos de equilíbrio da pressão parcial de CO₂ ou da concentração deste em meio aquoso. Apesar de ser relatado na literatura que, na dissolução do CO₂ em água, há um desvio desta lei devido à reação química do gás com o solvente (água)⁹⁹⁻¹⁰³, também é relatado que o CO₂ em água obedece bem à Lei de Henry até uma pressão parcial de aproximadamente 5 atm, e que tal lei, para este sistema, serve como uma aproximação útil para uma pressão parcial de CO₂ de até 10 atm⁹⁹⁻¹⁰³.

A racionalização conceitual, com ênfase macroscópica, para o borbulhamento e rápido escape de gás que ocorre com a abertura de uma garrafa de água carbonatada, tem sido explorada em livros para apoio didático^{4,5,6,8,11,12,14}. Após a abertura da garrafa, a difusão instantânea de gás para fora dela causa uma rápida diminuição na pressão parcial de CO₂ em seu interior. Isso diminui a solubilidade do gás no líquido, causando segregação de fase, de modo que o gás borbulha e se difunde para fora do líquido.

Após a abertura da garrafa, o tempo para o sistema (água com gás e atmosfera no interior da garrafa) atingir o equilíbrio com o CO₂ atmosférico, dependendo da temperatura e de outros fatores, ocorre em um intervalo da ordem de horas⁵². É oportuno também abordar a articulação teórica deste fenômeno em nível molecular⁴:

A solubilidade de um gás é definida como a concentração do gás dissolvido em uma solução em equilíbrio com o gás na fase gasosa. No equilíbrio, a velocidade com que as moléculas do soluto gasoso escapam da solução e entram na fase gasosa é igual à velocidade com que as moléculas de gás entram na solução.

Um aumento de pressão resulta em mais moléculas de gás que colidem com a superfície do líquido e entram na solução em um determinado tempo. A solução, então, alcança um novo equilíbrio quando a concentração de gás dissolvido no solvente é alta o suficiente para que a velocidade de escape das moléculas do gás da solução iguale-se à velocidade de entrada das moléculas do gás para a solução⁴.

CICLO DO CARBONO OCEÂNICO E O SISTEMA CARBONATO: POSSIBILIDADES DE CONTEXTUALIZAÇÃO PEDAGÓGICA

O Ciclo do Carbono: Alguns Aspectos de Interesse ao Ensino de Química

O CO₂, por suas propriedades espectroscópicas moleculares, está envolvido, assim como a água e outras substâncias, no balanço radiativo planetário, ao participar da absorção e emissão de radiação infravermelha na atmosfera.

Esta mesma substância está no cerne dos processos bióticos fundamentais: é a fonte de carbono para os seres autotróficos obterem energia e é, junto com a água, uma das substâncias utilizadas na fotossíntese e eliminadas na respiração da maioria dos seres vivos, autotróficos e heterotróficos, que habitam a Terra.

Ainda, a propriedade do CO₂ de ser, em água, um ácido fraco dá origem às formas de carbono inorgânico do sistema carbonato (DIC – *Dissolved Inorganic Carbon*), que servem como fonte de carbono a seres aquáticos e como tampão biológico em seres vivos e nos corpos d'água em geral, destacadamente nos oceanos. O íon bicarbonato e o CO₂ aquoso são, após a água, as espécies químicas intracelulares de maior concentração molar.

O CO_2 é gerado não só nos processos de fotossíntese oxigênica, respiração, fermentação e decomposição de seres vivos, mas também pelo ser humano, na obtenção de matéria-prima e de energia. O CO_2 e as espécies do sistema carbonato também estão abundantemente presentes, além da atmosfera, da biosfera, da criosfera, da antroposfera e da hidrosfera, na litosfera, na forma de minerais carbonáticos amplamente utilizados pela natureza e pelo ser humano em diversos processos biogeoquímicos e tecnológicos.

Assim, a onipresença do sistema carbonato na natureza e nas atividades humanas traz relevância para a sua abordagem no ensino de ciências. Desta forma, os próximos parágrafos discorrem acerca de algumas descobertas científicas e aspectos introdutórios sobre o contexto do CO_2 e do ciclo do carbono, tendo em vista a importância central deste ciclo biogeoquímico na natureza e o protagonismo do CO_2 e do sistema carbonato no ciclo do carbono.

Pode-se mencionar alguns estudos que contribuíram para se chegar à concepção química moderna do CO_2 como um gás da respiração e do ciclo do carbono, sendo um produto do metabolismo dos seres vivos. Um exemplo são os experimentos de Santorio Santorii (1561-1636)¹⁰⁴, que evidenciam a respiração celular, em que os alimentos (carboidratos, proteínas e lipídeos) são utilizados para a geração de energia metabólica, havendo a formação de água e CO_2 .

No entanto, no início do século XVII, a teoria atômica e a noção conceitual de elemento químico, substância e molécula ainda não possuíam uma base científica sólida. Tal fundamentação viria a ocorrer nos séculos XVIII e XIX, principalmente na Europa, com os cientistas do período que ficou conhecido como “revolução da química”^{105,106}. Nesse contexto, houve o desenvolvimento da “química pneumática”, caracterizada pela descoberta e medição de propriedades dos gases da atmosfera e da respiração, o que permitiu a formulação dos modelos químicos fundamentais da matéria, além de uma primeira caracterização científica de alguns processos do ciclo do carbono.

O cientista Jan Baptist van Helmont (1580-1644) deu grandes e pioneiras contribuições ao conhecimento científico acerca dos fundamentos sobre os gases. Por exemplo, observou que o gás liberado na combustão do carvão era o mesmo da fermentação vegetal e que esse mesmo gás poderia tornar o ar das cavernas irrespirável¹⁰⁷.

Um dos célebres experimentos de J. B. van Helmont foi o “*willow tree experiment*” (“experimento da árvore de salgueiro”), experimento pioneiro sobre a nutrição de plantas.

Nesse estudo, investigou-se o ganho de massa de um salgueiro plantado em vaso cuja massa, junto com a terra, foi aferida antes e durante o desenvolvimento da planta. Este e outros aspectos metodológicos levaram J. B. van Helmont à conclusão de que o ganho de massa da planta ocorria devido exclusivamente à água, pois, na época, o CO_2 ainda não havia sido caracterizado. Apesar dessa conclusão equivocada, tal experimento contribuiu significativamente para o desenvolvimento da ciência e é bastante importante na história da biologia, além de demonstrar a busca experimental, no século XVII, pela elucidação de processos biológicos fundamentais, como a fotossíntese e a biossíntese vegetal, bem como uma concepção implícita acerca da conservação da matéria¹⁰⁷.

Estudos envolvendo a observação de gases a partir de seres vivos também foram realizados no século XVII por cientistas como Marcelo Malpighi (1628-1694), Nehemiah Grew (1641-1712) e Stephen Hales (1677-1761), já tratando de observações e algumas conclusões sobre trocas gasosas entre os reinos mineral, animal e vegetal^{108,109}.

Em 1754, o cientista Joseph Black (1728-1799) estudou o desprendimento de um gás por ação térmica ou ácida em CaCO_3 e MgCO_3 e, pela primeira vez, isolou e mediu propriedades do CO_2 , chamado de “ar fixo”¹¹⁰. Alguns dos estudos de J. Black permitiram demonstrar que o novo gás descoberto extinguiu a chama, não servia de suporte à vida e correspondia ao gás liberado por carbonatos por ação térmica ou ácida, sendo o mesmo gás exalado na respiração^{110,111}.

Estudos contemporâneos de Henry Cavendish (1731-1810)¹¹² também mostraram que tanto a fermentação quanto a calcinação ou os tratamentos ácidos em substâncias alcalinas, como o mármore, dão origem ao mesmo gás, chamado na época de “ar fixo” ou de “ar ácido”. Este último termo foi utilizado por Torbern O. Bergman (1735-1784), que relatou, em seus estudos, a presença dessa substância na atmosfera³.

Muitos dos trabalhos de Joseph Priestley (1733-1804) também foram decisivos para grandes avanços científicos sobre os gases da respiração. J. Priestley produziu relatos experimentais que abordavam a parte biológica do que, a partir do século XIX, veio a ser descrito e conhecido como o ciclo do carbono^{110,112}.

Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794), por sua vez, através de experimentos realizados com seus colaboradores Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) e Jean-Baptiste Meusnier (1754-1793), determinou com precisão a composição elementar do então chamado “ar fixo”

ou “ar ácido”. Demonstrou tratar-se de uma substância composta de carbono e oxigênio, utilizando o nome “ácido carbônico” em seu artigo. A. L. Lavoisier, assim como muitos outros cientistas contemporâneos, questionava quais processos mantinham constante a concentração de gases na atmosfera. Também demonstrou que a respiração pode ser entendida quimicamente como uma “lenta combustão” e realizou trabalhos que já tratavam da noção de reservatórios carbônicos na natureza¹¹⁰⁻¹¹³.

Humphry Davy (1778-1829) também fez grandes contribuições para o desenvolvimento do conhecimento acerca do ciclo do carbono, ao tratar sobre os processos de fotossíntese e de respiração, conforme citado na literatura¹¹³. Na segunda metade do século XVIII e, principalmente, no século XIX, um conjunto de muitos estudos científicos possibilitou o surgimento da concepção moderna do ciclo do carbono¹⁰⁵⁻¹¹³.

No século XIX, ocorreu a descoberta científica da relação entre o ciclo do carbono e o balanço energético planetário¹¹⁴. Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) observou esse fenômeno matematicamente¹¹⁵. O termo “*Greenhouse effect*” foi cunhado apenas posteriormente, por Nils Gustaf Ekholm (1848-1923), próximo ao ano de 1900¹¹⁴.

John Tyndall (1820-1893) publicou, em 1861, o trabalho intitulado “*On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connection of radiation, absorption, and conduction*”¹¹⁶. Com suas pesquisas, pôde atribuir ao CO₂ e ao vapor d’água atmosféricos a absorção de radiação infravermelha, questionando-se se variações nas concentrações atmosféricas dessas substâncias poderiam explicar as eras glaciais evidenciadas e discutidas na época.

Os estudos pioneiros da cientista Eunice Newton Foote (1819-1888)¹¹⁷⁻¹¹⁹ deram suporte à questão sobre a influência das variações de concentrações de CO₂ atmosférico na dinâmica energética do planeta. Esses estudos foram contemporâneos aos de Claude Servais Mathias Pouillet (1790-1868), que também realizou reconhecidas e pioneiras contribuições na área¹²⁰.

Svante Arrhenius (1859-1927) realizou avanços nesta temática, na construção de uma análise matemática quantitativa sobre a influência do CO₂ no balanço energético planetário¹²¹. Mesmo tendo acesso a poucos dados espectroscópicos, o modelo de balanço energético de Arrhenius continha estimativas da absorção e emissão de radiação terrestre pela água e pelo

CO₂. Ele publicou, em 1896, o trabalho intitulado “*On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*”⁹.

Contemporaneamente, Avid Hogbom (1857-1940) deu contribuições científicas sobre a influência de fatores como o oceano, a vegetação terrestre e a formação de carbonatos e silicatos por intemperismo, importantes para o mantimento das concentrações de CO₂ aproximadamente constantes na atmosfera¹²¹.

Na década de 1930, Guy Stewart Callendar (1898-1964), ao compilar medidas mensais de temperatura realizadas entre 1880 e a década de 1930 por 147 estações de distintos lugares do planeta, pioneiramente estimou com cálculos uma variação da temperatura global da superfície terrestre de aproximadamente 0,3 °C para o período citado. Esse resultado veio a ser confirmado nas décadas mais recentes por técnicas mais avançadas. Callendar publicou trabalhos como os artigos intitulados “*The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature*” e “*Can carbon dioxide influence climate?*”, de 1938 e 1949, respectivamente¹²¹⁻¹²².

Gilbert Norman Plass (1920-2004) realizou suas pesquisas na década de 1950, quando já era possível dispor de medidas espectroscópicas mais detalhadas, além de mais informações sobre o ciclo do carbono, sobre emissões de gases do efeito estufa e de recursos computacionais mais avançados¹²³.

Hans Suess (1909-1993) e Roger Revelle (1909-1991) também deram contribuições para os estudos a respeito da dinâmica energética atmosférica do planeta. Na década de 1950 e nas décadas seguintes, publicaram estudos pioneiros utilizando a recém-desenvolvida geoquímica do C-14, a fim de calcular a distribuição e a velocidade de troca de carbono entre os vários reservatórios do ciclo do carbono. Entre as várias contribuições, Roger Revelle destacou-se pelo estabelecimento do fator Revelle (fator R), utilizado em oceanografia para estimar a capacidade oceânica de absorção de CO₂¹²⁴.

Também na década de 1950, as medições de CO₂ atmosférico de Charles David Keeling (1928-2005)¹⁸ ganharam destaque na história da ciência do ciclo do carbono. Conforme a literatura²:

Em 1958, Charles David Keeling iniciou uma série de medidas precisas de dióxido de carbono atmosférico que foram consideradas “o conjunto de dados ambientais individuais mais importantes obtidos no século XX”².

O gráfico de Keeling demonstra a tendência de aumento nas concentrações atmosféricas de CO₂ em Mauna Loa, desde a década de 1960 até 2010^{2,125}. A mesma curva mostra também pequenas, mas significativas e reprodutíveis variações cíclicas sazonais na concentração atmosférica de CO₂, que ocorrem devido às estações do ano.

Segundo Keeling, tratam-se das primeiras medições que permitem observar a captura do CO₂ do ar pela natureza, para o crescimento das plantas durante o verão, e o retorno desse gás a cada inverno subsequente². Tais oscilações regulares na concentração de CO₂ atmosférico ao longo de cada ano (variações sazonais da [CO₂] atmosférica) decorrem da fotossíntese vegetal, que domina a primavera e o verão e remove o CO₂ do ar; e da respiração animal, que domina o outono e o inverno e libera o CO₂ para o ar².

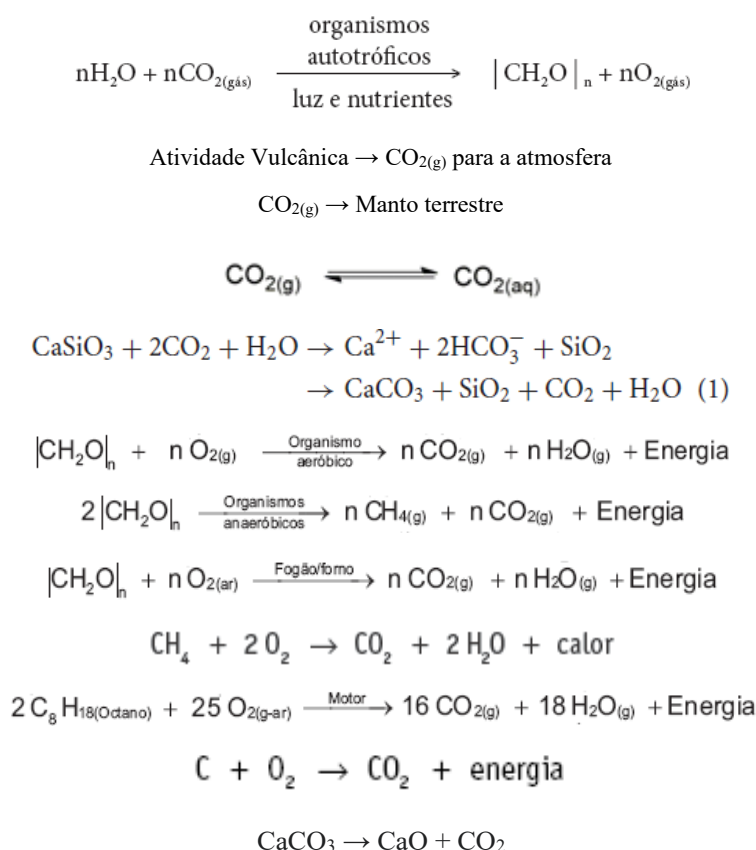
A curva de Keeling tem sido confirmada por experimentos adicionais em distintas localidades do planeta.

Ciclo do Carbono: Uma Introdução

O ciclo do carbono tem importância na natureza, na ciência, na tecnologia e na conservação ambiental. Trata-se do ciclo em que ocorre a transferência da energia do Sol para os seres vivos, bem como a transferência de energia para distintas partes do Sistema Terra. Esse ciclo e seus componentes estão relacionados à obtenção de energia e de matéria-prima pelos seres vivos.

O ciclo do carbono está também relacionado, juntamente com o ciclo hidrológico e outros fenômenos, à regulação do balanço energético no planeta Terra. Portanto, esse ciclo está ligado à dinâmica energética atmosférica nas distintas eras geológicas do planeta, desde antes de o ser humano habitá-lo¹²⁵ (**Figura 3.5**).

Figura 3.5 Processos químicos do ciclo do carbono



Fonte: Adaptado de: LENZI; FAVERO, 2019.

Em razão das distintas complexidades biogeoquímicas envolvidas no ciclo do carbono, bem como de todos os fenômenos a ele correlatos, o seu estudo compreende uma ampla diversidade de tópicos dentro da química e favorece a realização de atividades em um contexto de pensamento sistêmico¹²⁷.

Tais tópicos possuem diferentes abordagens na literatura científica ou em livros técnico-científicos para o ensino superior, diferindo não apenas quanto à profundidade, mas também quanto à inclusão ou não de certos conceitos, tópicos e fenômenos ligados ao ciclo do carbono, a depender do escopo de cada fonte.

Dessa forma, trabalhos com propostas didáticas envolvendo o ciclo do carbono podem ser beneficiados pela leitura de um referencial abrangente, que é citado neste livro.

O estudo do ciclo biogeoquímico do carbono, junto com os demais ciclos biogeoquímicos — notavelmente o da água e o do nitrogênio — tem importância essencial para a compreensão da dinâmica da energia e da matéria no planeta Terra. Conforme a literatura¹²⁵:

O carbono na Terra é a espinha dorsal para a construção do maquinário da vida. Além de servir como estrutura e base para o maquinário, a química do carbono também provê o modo de armazenamento de energia. A fotossíntese converte a energia da luz do Sol em energia de alta densidade em biomoléculas. Esta energia pode ser usada pela planta, ou talvez um animal coma a planta e utilize esta energia para si próprio. Em escalas de tempo geológicas, o enterro de carbono biológico armazena energia em uma escala planetária, “carregando” a biosfera com um estoque de biomoléculas e oxigênio atmosférico, como uma bateria gigante. Quando nós extraímos energia dos combustíveis fósseis, nós colhemos algo do estoque de energias ancestral da biosfera. No processo, nós rearranjamos a distribuição de carbono entre os seus vários reservatórios na Terra. [...] Oxigênio no ar e carbono orgânico na superfície são os polos da bateria da biosfera planetária¹²⁵.

O ciclo do carbono está no cerne da fenomenologia não só da obtenção de energia pelos seres vivos, mas também da dinâmica e da matriz energética que o ser humano utiliza para suprir as suas necessidades — fenômenos estes que têm correlação entre si¹²⁵.

A atmosfera tem papel fundamental na potência energética luminosa emitida pelo planeta, tendo em vista que alguns gases, como vapor d’água, CO₂, CH₄, N₂O, O₃ e clorofluorcarbonetos¹²⁸, apesar de juntos compreenderem apenas aproximadamente 0,1% da atmosfera, absorvem e reemitem radiação infravermelha em um mecanismo²⁰ que influi na dinâmica energética atmosférica e, portanto, planetária. Este fenômeno, conhecido como efeito estufa, contribui para o desenvolvimento da vida e dos ecossistemas. Há evidências de que o incremento, de origem antrópica, dos gases citados tem causado uma variação da temperatura média do planeta Terra e, assim, variações climáticas e fenômenos relacionados²⁰. Tecnologias e outras medidas para conter o aumento de CO₂ têm sido desenvolvidas e incluem a fixação desse gás em distintos compartimentos na biosfera e na litosfera.

Apesar da complexidade, a compreensão básica sobre o ciclo do carbono envolve o conhecimento dos principais reservatórios de carbono no planeta Terra, dos mecanismos físicos e biogeoquímicos de movimentação do carbono no planeta e da interferência humana neste ciclo²⁰. Uma compreensão mais apurada sobre o ciclo do carbono envolve não só uma

investigação mais profunda e detalhada sobre os aspectos citados, mas também sobre conceitos como *carbon budget*, pegada de carbono (*carbon footprint*), mecanismos de retroalimentação do ciclo do carbono (*feedbacks* negativo e positivo), forçamento radiativo e métodos experimentais para a evidênciação e aquisição de dados sobre o ciclo do carbono — tanto relacionados aos dias atuais como à história ecológica do planeta Terra ao longo das eras geológicas e nos séculos recentes^{20,126}.

No planeta Terra, os principais reservatórios do elemento químico carbono são: o carbono litosférico; o CO₂ gasoso atmosférico (0,036% do volume da atmosfera); o carbono inorgânico dissolvido (DIC ou *dissolved inorganic carbon*, também conhecido como sistema carbonato = CO_{2(aq)} + HCO_{3⁻(aq)} + CO_{3²⁻(aq)}) na hidrosfera; e, na biosfera, a matéria orgânica (biomassa) e o solo²⁰. Segundo a literatura, “o maior compartimento de carbono na Terra é aquele presente no oceano”¹¹⁰.

Conforme descrito: *“Carbon flows between each reservoir in an exchange called the carbon cycle, which has slow and fast components. Any change in the cycle that shifts carbon out of one reservoir puts more carbon in the other reservoirs”*¹²⁷.

A biomassa carbônica dos seres fotossintéticos e dos animais provém, em quase sua totalidade, do CO₂ atmosférico. Já os íons carbonatos, provenientes de rochas, têm reciclo lento e estão pouco biodisponíveis para os seres vivos. Sobre o ciclo do carbono, a literatura destaca que o armazenamento carbônico ocorre na forma de minerais sólidos, carbono inorgânico dissolvido oceânico, gás carbônico atmosférico, carbono orgânico no solo e em vegetais, além de carbono fóssil¹⁴¹.

Há uma parte rápida e uma parte lenta do ciclo do carbono, segundo a escala de tempo dos fenômenos. A parte lenta ocorre em centenas de milhares de anos, enquanto a parte rápida se dá em dias, anos ou até milhares de anos¹⁴¹.

A parte lenta do ciclo do carbono funciona como um termostato da temperatura da Terra, devido a fenômenos climáticos naturais que são originados periodicamente, a cada milhares ou centenas de milhares de anos, em razão de processos geológicos naturais. Por exemplo¹²⁷:

If carbon dioxide rises in the atmosphere because of an increase in volcanic activity, for example, temperatures rise, leading to more rain, which dissolves more rock, creating more ions that will eventually deposit more carbon

*on the ocean floor. It takes a few hundred thousand years to rebalance the slow carbon cycle through chemical weathering*¹²⁷.

Além da fixação em biomassa e da dissolução em corpos d'água — principalmente os oceanos —, o CO₂ é retirado da atmosfera através da chuva, conforme a citação acima. No solo, o CO₂ dissolvido em água da chuva reage com silicatos, como o CaSiO₃, formando, com influência da microbiota do solo, bicarbonato de cálcio. Esse composto é arrastado para o oceano, onde, por ação de organismos marinhos, precipita em CaCO₃, que se deposita na crosta continental. Esse processo, conhecido como reação de Urey, foi inicialmente proposto por Urey para explicar a origem da crosta continental de CaCO₃ e a baixa concentração de CO₂ atmosférico na Terra¹³⁰.

Conforme a literatura, as taxas relativas entre os fenômenos de intemperismo e desgaseificação, por serem sensíveis à disponibilidade de água — isto é, à evaporação e à precipitação (chuva) —, atuam como um mecanismo de termostato climático na escala de tempo de centenas de milhares de anos¹²⁵.

A maneira como a Terra consegue equilibrar os fluxos de desgaseificação e intemperismo é encontrando a concentração certa de CO₂, um mecanismo de estabilização do clima chamado termostato de CO₂ de intemperismo de silicato. A taxa de intemperismo depende da disponibilidade de chuvas de água doce e do escoamento em que as rochas podem se dissolver. A taxa de escoamento de água doce depende, por sua vez, do clima da Terra.

Em um clima frio, há menos precipitação geral e, portanto, uma taxa mais lenta de absorção de CO₂ pelas reações de intemperismo. Se o clima estiver muito frio, um desequilíbrio nos fluxos permitiria que o CO₂ se acumulasse na atmosfera, aquecendo o clima, aumentando a taxa de intemperismo e empurrando os fluxos de desgaseificação e intemperismo de volta ao equilíbrio.

Se o clima estiver muito quente, o CO₂ é consumido pelo intemperismo mais rapidamente do que é desgaseificado da Terra, resfriando o planeta e relaxando em direção ao equilíbrio do fluxo de carbono¹²⁵.

Ciclo do Carbono, Sistema Carbonato e os Oceanos: Uma Breve Introdução e Implicações Pedagógicas

No contexto do ciclo do carbono, o oceano tem centralidade por sua importância como grande reservatório de carbono na biosfera e como fonte de matéria essencial para os seres

vivos, além de ser um reservatório de energia térmica fundamental para a regulação climática. A forma predominante de carbono na natureza, o CO_2 , transita entre os seres vivos, a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera, na forma gasosa molecular ou dissolvida em água; nas formas iônicas em minerais sólidos (litosfera); ou na forma de íons hidratados, como HCO_3^- e CO_3^{2-} ²⁰. Essas espécies químicas de carbono inorgânico, que permeiam a biosfera, a litosfera, a hidrosfera e a atmosfera, atuam como um tampão no oceano e nos seres vivos, o que é necessário à homeostase ecossistêmica.

Com relação às trocas de CO_2 entre atmosfera e oceanos, a literatura traz que¹³¹:

O balanço de massa no fluxo de CO_2 entre a atmosfera e o oceano é resultado de um desequilíbrio nas concentrações desse gás entre os dois compartimentos, de acordo com a localização. Assim, em regiões próximas ao equador, as águas quentes favorecem uma transferência maior do oceano para a atmosfera, enquanto em médias e altas latitudes predomina o processo inverso, em que CO_2 da atmosfera é dissolvido nas águas frias. Alguns modelos globais sugerem que há uma transferência líquida de CO_2 da atmosfera para os oceanos na faixa de $2,0 \pm 0,8 \text{ GtC/ano}$ ¹³¹.

De acordo com a escala de tempo dos fenômenos do ciclo do carbono, a literatura diferencia uma parte rápida (dias, anos ou até milhares de anos) e uma parte lenta do ciclo (centenas de milhares de anos)¹²⁷. Além da conversão de rochas carbonáticas em CO_2 atmosférico, conforme citado, a parte lenta do ciclo do carbono também possui uma componente um pouco mais rápida: os oceanos.

O balanço de carbono nos oceanos envolve os processos do sistema carbonato (Equações 1 a 5), a captação de íons carbonato por organismos calcificantes, a respiração e a fotossíntese do fitoplâncton e de outros seres fotossintéticos, a deposição de carbonato de cálcio e outras substâncias carbônicas no fundo dos oceanos advinda da decomposição de organismos marinhos, dentre outros processos^{20,127}. Conforme a literatura, “o ciclo do carbono marinho é dominado pela química do sistema carbonato”¹³²⁻¹⁴⁰.

Tal complexidade pode ser abordada no ensino de química em nível superior, possibilitando correlações entre fenômenos ambientais oceânicos e aspectos químicos, como: química ácido-base, lei de Henry, reações de precipitação, fotossíntese, respiração, difusão e outros processos químicos.

Com relação aos oceanos e a outros reservatórios de carbono, a literatura expõe que¹⁴¹:

Vários importantes sumidouros de CO₂, que são mecanismos e processos que removem o CO₂ da atmosfera, ocorrem no planeta Terra. A formação de rochas sedimentares (litificação) para formar o calcário (CaCO₃) representa, de longe, o maior sumidouro. Entretanto, pelo fato de o processo de litificação requerer um tempo muito longo para remover o CO₂ da atmosfera, não vamos considerar esse processo como importante na mitigação do efeito estufa antropogênico.

Em uma escala do tempo humano, os oceanos representam o maior sumidouro. Os oceanos são um reservatório imenso no ciclo global de carbono. A primeira maneira pela qual os oceanos removem o CO₂ da atmosfera é por meio da dissolução do gás (bomba de solubilidade). A água fria do oceano polar dissolve, na superfície, o CO₂ atmosférico. As águas superficiais, ricas em CO₂, mergulham em direção ao oceano profundo, onde o CO₂ é sequestrado e armazenado por várias centenas de anos. Esse tipo de sumidouro deverá tornar-se menos importante conforme as regiões polares se tornam mais quentes.

A segunda maneira pela qual os oceanos removem o CO₂ atmosférico é de modo biológico (bomba biológica). O fitoplâncton marinho absorve o CO₂ atmosférico e, posteriormente, libera o carbono sob uma forma sólida que afunda até o leito oceânico, onde então ele é sequestrado e retido por tempo indeterminado na litificação das rochas sedimentares. Estima-se que esse processo reduza a concentração de CO₂ atmosférico por cerca de um terço da quantidade que teria sem esse mecanismo.

[...] outros sumidouros atmosféricos são minoritários em comparação aos oceanos. Os solos, segundo principal sumidouro, sequestram o CO₂ atmosférico por meio da contenção de matéria orgânica parcialmente decomposta, conhecida como húmus. Embora a quantidade total de CO₂ contido no solo seja desconhecida, práticas aprimoradas de conservação do solo auxiliam, pelo menos um pouco, na mitigação do acúmulo de CO₂ na atmosfera.

O terceiro principal sumidouro é um componente da biosfera aderido aos solos: a vegetação, que absorve CO₂ durante a fotossíntese e armazena o carbono em sua biomassa na medida em que ela cresce. Apenas 30% da superfície do planeta é terra firme, e apenas 30% dessa terra está coberta por florestas. Assim, a absorção pela vegetação é um sumidouro muito menor do que os oceanos e um pouco menor do que os solos¹⁴¹.

Dos estimados 1,37.10⁶ km³ de água na Terra, 97,25% são águas oceânicas, que cobrem aproximadamente 71% da área da crosta terrestre. Cerca de metade da produtividade primária

planetária é realizada pela microbiota marinha¹³³. Conforme a literatura: “nos oceanos, estima-se que a fotossíntese produza anualmente de 25 a 50 bilhões de toneladas de carbono reduzido”¹⁴².

Os oceanos têm importância fundamental para o equilíbrio energético no planeta¹⁴², bem como são diretamente uma fonte de alimento, matéria-prima e energia para o ser humano¹³⁷. Dessa forma, o entendimento da química das águas oceânicas é de importância estratégica para o ensino de ciências, objetivando o desenvolvimento de propostas didáticas em um contexto de sustentabilidade e de pensamento sistêmico, tendo em vista também a centralidade das águas oceânicas dentro do ciclo do carbono¹⁴³:

Alfred Redfield (1890–1983) discovered that nitrogen to phosphorus ratios of phytoplankton in seawater are constant and similar to dissolved ratios, implying co-evolution of the environment and organisms living in it. His seminal 1958 article started as follows: “It is a recognized principle of ecology that the interaction of organisms and environment are reciprocal. The environment not only determines the conditions under which life exists, but the organisms influence the conditions prevailing in their environment” (Redfield 1958).

The latter was articulated in the Gaia hypothesis of Lovelock (1972): The Earth became and is maintained habitable because of multiple feedback mechanisms involving organisms. For instance, biologically mediated weathering of rocks removes carbon dioxide from the atmosphere and generates bicarbonate and cations that eventually arrive in the ocean, where calcifiers produce the minerals calcite and aragonite and release carbon dioxide back to the atmosphere¹⁴³.

A respeito da entrada de carbono nos oceanos, advinda dos continentes, a literatura traz que¹⁴⁴:

O carbono proveniente dos continentes entra nos ecossistemas marinhos através dos rios [...], fluxo de água subterrânea e deposição atmosférica. As entradas fluviais são normalmente mais importantes, e sua composição depende do tipo de vegetação, solo e litologia da bacia de drenagem¹⁴⁴.

A oceanografia é o estudo científico dos oceanos, sendo dividida em quatro grandes áreas: oceanografia física, oceanografia química, oceanografia biológica e oceanografia geológica¹³⁷. Tendo em vista a centralidade da química no entendimento dos processos naturais

que ocorrem nos oceanos, e a relação desses processos com todo o ambiente planetário, o ensino de distintos tópicos de química, em diferentes níveis de escolaridade, pode ser realizado utilizando as águas oceânicas como um sistema de investigação e de contextualização com potencial para a interdisciplinaridade.

A oceanografia química busca investigar e descrever, por exemplo, quais processos controlam a composição média do oceano¹³⁸. Tais processos podem ser de natureza física, química ou biológica, estando, em grande parte, inter-relacionados. A partir de informações sobre a escala de tempo de variação das concentrações e da distribuição espacial vertical de espécies químicas nas águas marinhas, pode-se avançar no entendimento de processos físicos, químicos, biológicos e geológicos que ocorrem nos oceanos¹³⁹.

Estudos como: i) o papel dos oceanos no ciclo do carbono e as respectivas correlações climáticas; ii) a relação entre oceano, CO₂ e dinâmica energética planetária em distintas eras geológicas, através da investigação de traçadores isotópicos e químicos obtidos em calcita e compostos orgânicos no oceano; e iii) pesquisas sobre fertilização marinha, como a fertilização de ferro, são exemplos de áreas de investigação dentro da oceanografia relacionadas também à geologia¹³⁹.

O desenvolvimento da instrumentação e das metodologias de análises químicas ao longo dos séculos recentes é um fator essencial para a evolução da compreensão dos mecanismos dos processos que ocorrem nos oceanos¹³⁹.

Estima-se que as atividades humanas tenham gerado 655 ± 65 Pg de carbono entre 1850 e 2019, e que o oceano captou 24% dessa massa. Isso se deve à sua alta área superficial e ao volume de água, que dissolve e reage com o CO₂ atmosférico gasoso para formar as espécies de carbono inorgânico dissolvido (DIC): CO₂ (aquoso), H₂CO₃, HCO₃⁻ e CO₃²⁻. Esse processo leva ao aumento da concentração total de DIC nas águas superficiais oceânicas, ao incremento das concentrações de CO₂ e HCO₃⁻ dissolvidos e à redução da concentração de CO₃²⁻ e do pH das águas oceânicas¹¹⁶.

É relatado na literatura que: “Com exceção dos carbonatos e do carbono orgânico precipitados e retidos em sedimentos, a maior parte do carbono encontra-se nos oceanos sob a forma de carbono inorgânico dissolvido (CID = [CO₂] + [HCO₃⁻] + [CO₃²⁻])”.

A dinâmica de equilíbrio dessas espécies no oceano exerce influência na biodisponibilidade de nutrientes, conforme descrito na literatura¹⁴⁵:

Um breve exemplo retirado da química dos carbonatos pode ajudar a esclarecer a natureza do complexo problema dos ciclos químicos em sistemas naturais. Mais fotossíntese (fixação de CO_2) ocorre no verão do que no inverno. Mais decomposição orgânica (liberação de CO_2) ocorre no inverno do que no verão. O desgaste das rochas também é alterado sazonalmente. Portanto, todos os processos que dependem da quantidade de CO_2 dissolvido em sistemas de água podem apresentar variações sazonais.

Um desses processos é a evolução química das cavernas. Outro é a nutrição da vida em corpos de água. O “sistema vivo médio” é composto dos seguintes elementos nas seguintes proporções [...]. Embora o próprio CO_2 raramente seja o nutriente limitante, a quantidade de CO_2 dissolvido exerce forte influência na dissociação do ácido fosfórico e, portanto, na quantidade de PO_4^{3-} livre em solução. PO_4^{3-} frequentemente pode ser um nutriente limitante em sistemas aquosos.

Não só existem fontes naturais de perturbações cíclicas do nível de CO_2 , mas também existem perturbações provocadas pelo homem. A queima de combustível fóssil introduz duas vezes mais CO_2 nos sistemas de água natural do que o desgaste natural das rochas carbonáticas. Embora as pessoas e as plantas pudessem sobreviver em uma atmosfera dez vezes mais concentrada em CO_2 do que agora (dez vezes é o número projetado para a quantidade de CO_2 na atmosfera se todas as reservas forem usadas), o efeito nos ciclos climáticos e no sistema de tamponamento em águas naturais e, portanto, nas concentrações de espécies químicas dependentes do pH é uma questão amplamente sem resposta.

Problemas como esses envolvem muita química pura, mas, além disso, são muito interdisciplinares em seu escopo geral¹⁴⁵ [tradução nossa].

O DIC, importante para os processos bioquímicos oceânicos, tem tido um incremento nos oceanos nos séculos recentes. Esse incremento origina o fenômeno conhecido como acidificação (ou carbonatação) oceânica, que pode ser definido como: “uma redução no pH por um período longo de tempo, tipicamente décadas ou mais, causado primariamente pela captação de CO_2 da atmosfera, mas que também pode ser causado por outras adições ou subtrações do oceano”¹³⁴.

De acordo com as equações de equilíbrio do sistema carbonato, é possível inferir efeitos fundamentais que caracterizam esse fenômeno: aumento dos parâmetros DIC total, CO_2 dis-

solvido e concentração de íons bicarbonato; e redução do pH e da concentração de íons carbonato. Conforme a literatura, o carbono inorgânico dissolvido total oceânico corresponde a aproximadamente 200 vezes a quantidade de dióxido de carbono dissolvido¹³⁴⁻¹⁴⁶.

Alguns aspectos da acidificação oceânica, interessantes para abordagens em contextos pedagógicos, incluem: i) o fenômeno tem influência sistêmica, sendo importante na biodisponibilidade de nutrientes, nos ciclos biogeoquímicos e no equilíbrio dos organismos calcificantes¹²⁰ além de afetar ecossistemas de forma geral; ii) a temática requer um olhar interdisciplinar para o ensino, dada a alta complexidade química, biogeoquímica, física e matemática envolvida. Mesmo em atividades introdutórias no ensino superior, é necessário planejamento fundamentado em bibliografia de distintas áreas, como oceanografia e química¹³²⁻¹⁴².

Abordagens pedagógicas introdutórias da acidificação oceânica em nível superior podem trabalhar, além dos conceitos já discutidos, com a definição de noções fundamentais em nível de graduação, como capacidade tamponante, alcalinidade, saturação e precipitação. Também podem constituir um exercício fenomenológico em cinética e equilíbrio químico, considerando as diversas escalas de tempo em que etapas próton- ou hidróxido-dependentes, de origem biológica ou inorgânica, ocorrem ao longo da coluna d'água oceânica e nas diferentes estações do ano¹³²⁻¹⁴⁰.

Nesse sentido, é relatado que¹³²:

*Alkalinity, the excess of proton acceptors over donors, plays a major role in ocean chemistry, in buffering and in calcium carbonate precipitation and dissolution. Understanding alkalinity dynamics is pivotal to quantify ocean carbon dioxide uptake during times of global change*¹³².

E complementando com relação à capacidade tamponante em águas naturais¹⁰:

Muitos aspectos contribuem para as variações no pH de águas subterrâneas e de lagos em uma determinada área geográfica. Esses fatores incluem padrões de vento e clima prevaletentes, tipos de solo, fontes de água, natureza do terreno, características das plantas, atividades humanas e características geológicas.

A suscetibilidade de águas naturais à acidificação é fortemente determinada pela sua capacidade tamponante, sendo que o principal tampão dessas águas é uma mistura contendo o íon bicarbonato e o ácido carbônico. Lembre-se

de que a capacidade tamponante de uma solução é proporcional à concentração do agente tamponante. Assim, quanto maior a concentração de bicarbonato dissolvido, maior é a capacidade da água de neutralizar ácidos presentes na chuva ácida.

A fonte mais importante de íons bicarbonato em águas naturais é o calcário, ou carbonato de cálcio, que reage com o íon hidrogênio [...]. Áreas ricas em calcário apresentam lagos com concentrações relativamente elevadas de bicarbonato dissolvido e, portanto, baixa suscetibilidade à acidificação. Por outro lado, granito, arenito, argila e outras rochas que contêm pouco ou nenhum carbonato de cálcio estão associadas a lagos com alta suscetibilidade à acidificação¹⁰.

Devido à captação de CO₂ de origem antrópica pelo oceano nos séculos recentes, o meio aquoso marinho diminuiu o grau de supersaturação em relação aos minerais calcita e aragonita, mas manteve-se supersaturado em relação a esses minerais¹⁴⁷. No entanto, pesquisas evidenciam que “a velocidade de calcificação de muitos organismos formadores de concha responde ao grau de supersaturação”¹⁴⁷ desses minerais em água.

É mencionado em fontes bibliográficas que a saturação de aragonita — forma mineral de carbonato de cálcio 50% mais solúvel que a calcita e aproximadamente tão comum quanto esta nos seres marinhos calcificantes — pode estar comprometida neste século¹⁴⁷.

Os impactos biológicos do aumento das concentrações de DIC e das concentrações de CO₂ e HCO₃⁻, concomitante à diminuição da concentração de CO₃²⁻ e do pH oceânico, não se restringem à influência na dinâmica de formação mineral nos seres calcificantes¹⁴⁷, podendo também influenciar a especiação química de nutrientes no mar e as taxas de fixação de carbono e de nitrogênio em alguns organismos fotossintéticos marinhos¹⁴⁷.

Neste sentido, diversos fenômenos podem ser trabalhados. Por exemplo, pode-se realizar uma abordagem fenomenológica em termos das determinantes, em escala atômico-molecular, da variação das constantes de equilíbrio de solubilidade da calcita e da aragonita com a profundidade oceânica (efeito da pressão), entre muitos outros fenômenos químicos, físicos e biológicos no contexto biogeoquímico do ciclo do carbono marinho. Esses dados podem ser explorados em trabalhos como o artigo “*Chemistry in Natural Water Systems: A General Discussion*”, de Leyla Coyne, publicado no *Journal of Chemical Education*¹⁴⁵, bem como nos diversos efeitos químicos, físicos e biogeoquímicos mencionados na bibliografia de Oceanografia Química.

É importante considerar a vasta complexidade na fronteira do conhecimento quando se trabalha com biogeoquímica, mesmo em abordagens simplificadas de tópicos em química. Por exemplo, o aumento da concentração protônica na carbonatação oceânica pode estar associado a múltiplos feedbacks em estudo¹⁴⁸, em distintas escalas de tempo, cujos mecanismos ainda não estão completamente elucidados. Por isso, o estudo e a preparação de atividades pedagógicas nesse sentido requerem observações fundamentadas em fontes bibliográficas diversas, buscando informações adicionais sobre cada aspecto a ser trabalhado (**Figuras 3.6 a 3.9**).

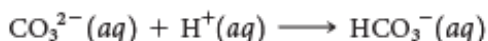
Com relação à solubilidade do carbonato de cálcio em água, é exposto em livro de apoio didático em química¹⁹ que: [...] $\text{CaCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + \text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ $K_{\text{sp}} = 4.5 \times 10^{-9}$.

[...]

Scientists estimate that one-third to one-half of the CO_2 emissions resulting from human activity have been absorbed by Earth's oceans. While this absorption helps mitigate the greenhouse gas effects of CO_2 , the extra CO_2 in the ocean produces carbonic acid, which lowers the pH.

Because CO_3^{2-} is the conjugate base of the weak acid HCO_3^- , the carbonate ion readily combines with the hydrogen ion.

Figura 3.6 Equação do Sistema Carbonato



Fonte: Adaptado de (BROWN *et al.*, p. 753, 2016).

This consumption of the carbonate ion shifts the CaCO_3 dissolution equilibrium to the right, increasing the solubility of CaCO_3 , which can lead to partial dissolution of calcium carbonate shells¹⁹ [...].

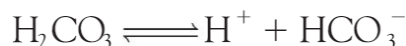
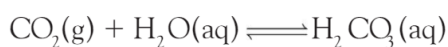
É interessante notar também a complexidade envolvida no estudo do sistema carbonato em águas oceânicas, devido aos múltiplos equilíbrios químicos presentes.

Para a compreensão desse fenômeno, uma estratégia didática possível é o estudo de três exemplos fundamentais de equilíbrio químico do sistema carbonato. Esses exemplos podem ser abordados de forma sequencial, proporcionando ao estudante maior clareza na aprendizagem sobre a acidificação dos oceanos.

Exemplo 1: meio aquoso em equilíbrio com o CO₂ atmosférico.

Nesse exemplo, o pH previsto é aproximadamente 5,6, dependendo do valor exato da pressão parcial de CO₂ atmosférico considerada. Para efeito de cálculo, pode-se considerar uma pressão parcial de CO₂ atmosférico aproximadamente igual a 380 ppm, a 25 °C. As equações de equilíbrio relevantes para este caso já foram abordadas em tópico anterior:

Figura 3.7 Equação do Sistema Carbonato

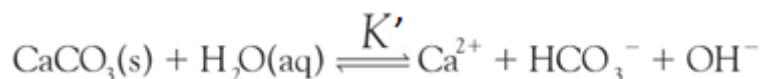


Fonte: BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

Exemplo 2: meio aquoso em equilíbrio (solução saturada) com CaCO₃ sólido.

Nesse exemplo, são considerados dois processos principais: i) o equilíbrio de solubilidade do CaCO₃, ou seja, a dissociação iônica do sal em água; ii) a hidrólise do íon carbonato, que resulta em reações adicionais no meio aquoso.

Figura 3.8 Equação do Sistema Carbonato



Fonte: BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

Assim, é previsto um pH de aproximadamente 10,0 a 25 °C, considerando o valor da constante de equilíbrio K' a 25 °C, obtida a partir do produto de ambos os processos considerados (ver páginas 604–607 do livro *Química Ambiental*, 4ª edição, de Colin Baird e Michael Cann).

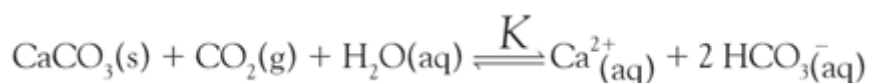
Conforme a literatura, é possível demonstrar que a solubilidade do CaCO₃ em água é naturalmente maior do que seria se não houvesse a hidrólise do íon carbonato.

Exemplo 3: meio aquoso em equilíbrio com o CO₂ atmosférico e com CaCO₃ sólido.

Neste exemplo, são considerados os seguintes equilíbrios: i) dissociação iônica do CaCO_3 em água, formando íons cálcio e carbonato aquosos (hidratados); ii) hidrólise do íon carbonato; iii) solubilização do CO_2 gasoso em água; iv) primeira dissociação ácida do ácido carbônico e, naturalmente, também é considerado o equilíbrio de autoprotólise da água.

A partir desses equilíbrios, obtêm-se as condições que definem o pH e a distribuição das espécies químicas no sistema:

Figura 3.9 Equação do Sistema Carbonato



Fonte: BAIRD, C.; CANN, M., 2011.

Nesse caso (exemplo 3), o pH calculado (ver páginas 605–608 do livro de Colin Baird e Michael Cann citado) é de aproximadamente 8,3 a 25 °C. Esse valor está próximo do pH médio de 8,1 determinado em águas superficiais oceânicas, considerando, porém, a influência da força iônica e outras complexidades, como efeitos cinéticos e biogeoquímicos, bem como as constantes variações na concentração protônica em águas oceânicas, que dependem da profundidade, do período do dia, da estação do ano, entre outros fatores.

A fenomenologia que explica como esses fatores contribuem para a variação da concentração protônica em águas oceânicas, assim como para a concentração das demais espécies do sistema carbonato, pode ser abordada em contextos didáticos, relacionando-se a processos bióticos, físicos, químicos e geológicos estudados em nível de graduação.

Os exemplos 1 e 2 servem como base fenomenológica e matemática para o entendimento do exemplo 3, que representa um caso de equilíbrio químico mais complexo, envolvendo mais processos e etapas, alguns em comum com os exemplos anteriores. O equilíbrio múltiplo do exemplo 3 pode ser considerado um modelo representativo para águas oceânicas, conforme apresentado na página 607 (edição em português) da 4ª edição do livro *Química Ambiental*, de Colin Baird.

Neste equilíbrio, observa-se que as águas oceânicas estão em interface com CO_2 atmosférico e com carbonato sólido inorgânico (minerais carbonáticos) e biológico (seres calcificantes). A velocidade de transferência de CO_2 gasoso da atmosfera para o oceano pode aumentar, enquanto a transferência de massa de CaCO_3 sólido para íons carbonato nas águas superficiais pode não ser rápida o suficiente para compensar a acidez advinda da entrada de CO_2 gasoso. Além disso, outras fontes de CO_2 , bicarbonato e carbonato estão presentes nas águas oceânicas, como processos de respiração, fotossíntese, fermentação e decomposição.

Acerca do exemplo 3, em relação aos equilíbrios in vitro, é interessante notar que²⁰:

A quantidade de CO_2 dissolvida [...] é 35 vezes a quantidade que dissolve sem a presença de carbonato de cálcio [...]. Além disso, a concentração calculada de cálcio é quatro vezes o valor calculado sem a presença de dióxido de carbono. Assim, a reação ácida de CO_2 dissolvido e a reação básica de carbonato dissolvido têm um efeito sinérgico uma sobre a outra que aumenta a solubilidade do gás e do sólido [...]. Em outras palavras, a água que contém dióxido de carbono dissolve mais prontamente o carbonato de cálcio²⁰.

A citação anterior, sobre o aumento da solubilidade de CO_2 em solução contendo carbonato de cálcio, é relevante para introduzir a temática atual de captura de carbono²⁰.

Após a apresentação desses três casos exemplares de equilíbrio químico do sistema carbonato (SC), é possível introduzir aos estudantes a questão do pH dos oceanos de forma simplificada, porém quantitativa, seguindo abordagens já descritas na literatura de ensino de química. Apesar das simplificações, tais modelos apresentam boa concordância com medições experimentais de pH em águas superficiais oceânicas.

Esses três casos possuem importância fundamental para a compreensão da química ácido-base do meio aquoso na natureza, mas também apresentam particularidades que podem gerar complexidade no ensino e a aprendizagem: i) o sistema envolve equilíbrios em meio heterogêneo trifásico (gás-líquido-sólido), com formação de um ácido fraco; ii) existem distintas terminologias e abordagens na literatura para o tratamento matemático da primeira dissociação ácida do ácido carbônico, conforme discutido anteriormente e esclarecido em livros didáticos e artigos científicos na área de pesquisa em ensino.

Após abordar os equilíbrios químicos necessários para estimar o pH das águas superficiais oceânicas, pode-se introduzir aos estudantes, em termos teóricos, as relações entre o SC e as complexidades biogeoquímicas do oceano: i) influência da salinidade e da temperatura nas constantes de equilíbrio das etapas essenciais do SC — solubilização de CO_2 atmosférico, dissociações ácidas e equilíbrio de precipitação de CaCO_3 ; ii) processos biológicos, físicos e geológicos marinhos que afetam essas etapas essenciais de equilíbrio do SC; iii) complexidades relacionadas às medidas de pH in situ e em laboratório, considerando fatores ligados à medição potenciométrica, como a necessidade de padrões especiais de “águas do mar sintéticas” e escalas de pH TOT e SWS.

Esses fatores (i, ii e iii) variam quantitativamente com a profundidade da coleta ou da medição, bem como em função de aspectos sazonais, temporais e geográficos (latitude e longitude), adicionando complexidade ao estudo do sistema carbonato em oceanos, conforme discutido na literatura¹³⁷.

No contexto da Oceanografia Química, dados históricos podem ser utilizados para introduzir conceitos básicos e análises químicas. Os primeiros estudos químicos sobre água do mar são creditados a Robert Boyle, que em 1674 publicou a extraordinária obra *Observations and Experiments on the Saltness of the Sea*¹⁴⁹. Mais tarde, em 1772, Antoine L. Lavoisier publicou um artigo considerado a primeira análise de água do mar. Em 1784, o químico sueco Torbern Olaf Bergman publicou uma detalhada análise de “todas as águas naturais”, incluindo uma lista de espécies químicas identificadas em amostras de água do mar. No início do século XIX, os estudos pioneiros de Alexander Marcet (1770–1822) contribuíram para estabelecer o que hoje é conhecido como o Princípio de Marcet, relevante para o desenvolvimento da oceanografia^{149,150}.

Uma complexidade, bem caracterizada nos dias de hoje e já considerada pelos cientistas dos séculos XVIII e XIX — ainda que na época sem toda a fundamentação e terminologia teórica atualmente disponível — reside nas limitações da determinação gravimétrica da salinidade das águas. A vaporização do meio aquoso até a massa da amostra permanecer constante requer altas temperaturas para remover a água mais fortemente ligada aos retículos iônicos. Essa condição pode gerar dados inconsistentes de salinidade, devido, por exemplo, à decomposição térmica de íons carbonato dissolvidos em CO_2 , resultando em carbonatos ou óxidos sólidos.

Além disso, em tais temperaturas, ocorre, em alguma extensão, a volatilização de $B(OH)_3$ e de haletos (X) na forma de HX e X_2 gasosos. Assim, a massa total de sais obtida na análise gravimétrica por secagem térmica é menor que a massa real de sais totais na amostra de água do mar¹³⁹.

Para superar essa limitação, a partir do século XIX passou-se a utilizar a determinação da salinidade por titulação do cloreto dissolvido na água do mar com $AgNO_3$, baseada no princípio das proporções constantes. Apesar desse princípio, a correlação exata entre a concentração de cloreto e a salinidade da amostra não é universal. Atualmente, a determinação de salinidade é realizada comumente por métodos baseados na condutância do meio aquoso¹³⁹.

Nos oceanos, muitos íons majoritários da água do mar, podem ser considerados conservativos, ou seja, suas concentrações não variam significativamente devido a “reações químicas na escala de tempo da circulação oceânica”. Nesses casos, as distribuições locais de salinidade são controladas por um balanço entre evaporação e precipitação. Estes elementos são denominados conservativos¹³⁹. Entre os íons conservativos estão Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} e Mg^{2+} , que juntos correspondem a aproximadamente 97 % da salinidade oceânica.

Os elementos classificados como bioativos participam de processos biológicos e, por isso, a sua concentração varia, geralmente aumentando com a profundidade, tendo em vista que tais elementos servem de nutrientes para o plâncton na zona superficial eufótica e retornam para o meio aquoso como minerais dissolvidos em profundidades maiores, onde há decomposição de matéria orgânica de origem biológica. Minerais traço, como Fe e Zn, O_2 dissolvido e as espécies de carbono inorgânico dissolvido do sistema carbonato (CO_2 , HCO_3^- e CO_3^{2-}), são exemplos de elementos bioativos.

Conforme demonstrado amplamente na literatura, em águas doces (rios, lagos, etc.) e oceânicas, a racionalização e a correlação teórica e experimental de medidas de pH e de concentrações de espécies químicas dissolvidas são mais complexas do que as mesmas racionalizações e correlações realizadas a partir de experimentos em condições comumente utilizadas em laboratório.

Uma das razões para tal distinção é a dinâmica de precipitação do carbonato de cálcio em águas naturais: há, nesse caso, tanto precipitação química quanto biológica desse sal, o que pode variar conforme a profundidade, a qual, por sua vez, apresenta, além da pressão

hidrostática variável, uma estratificação térmica de variação sazonal. Fenômenos biológicos, como a fotossíntese, também são fatores que afetam as concentrações de espécies químicas com a profundidade: há uma maior penetrabilidade luminosa na superfície e uma maior taxa de decomposição da matéria orgânica no fundo, o que exerce influência direta na concentração de CO_2 e no pH do meio aquoso em diferentes profundidades de corpos d'água, como lagos, rios e o oceano.

Por exemplo, o caso das medições de pH e das concentrações de íons em um lago pesquisado na literatura, em diferentes alturas (topo e fundo) e nas quatro estações do ano, exemplifica as tendências citadas. Esse estudo também demonstra uma sub-saturação de íons cálcio no fundo do lago, o que aponta para um controle difusional das concentrações iônicas na coluna vertical hídrica¹⁵⁰.

A determinação da saturação de CaCO_3 em águas naturais, notavelmente as oceânicas, é uma questão de análise complexa, que vem sendo mais intensamente pesquisada desde a década de 1960. Nas águas oceânicas, embora as flutuações de pH sejam, em geral, menores que em águas doces, há também complexidades, como a variação com a profundidade nos valores de pH e da concentração das espécies do sistema carbonato, incluindo os íons cálcio¹⁵⁰. Tanto o produto de solubilidade do carbonato de cálcio (calcita) quanto a dissociação ácida do ácido carbônico têm dependência com a pressão hidrostática, que varia com a profundidade¹⁴⁵.

Estudos indicam que a superfície das águas marinhas possui uma supersaturação de carbonato de cálcio estável à precipitação inorgânica em uma escala de milhares de anos. Já no mar mais profundo, a literatura relata haver uma insaturação de carbonato de cálcio. A análise dessa questão deve considerar a alta concentração de eletrólitos e a formação de pares iônicos entre as espécies iônicas majoritárias: íons sódio, magnésio, cálcio, potássio, cloreto, sulfato, bicarbonato e carbonato¹⁵⁰.

A solubilidade de gases depende menos da pressão hidrostática do que da pressão parcial do gás na atmosfera¹⁵⁰. Conforme a literatura¹⁵¹:

The seawater pH measurement is usually quite complicated because that matrix is characterized by a high ionic strength leading to calibration errors if NIST standards are used. For this matrix, different pH scales like the “total hydrogen ion concentration scale” (TOT) and the “seawater scale”

(SWS), are defined, and suitable synthetic seawater solutions must be prepared according to standard procedures to calibrate the glass electrode¹⁵¹.

Conforme demonstrado amplamente na literatura, em águas doces e oceânicas a racionalização e a correlação teórica e experimental de medidas de pH e de concentrações de espécies químicas dissolvidas são mais complexas do que as mesmas racionalizações e correlações realizadas a partir de experimentos em condições comumente utilizadas em laboratório.

Uma das razões para tal distinção é a dinâmica de precipitação do carbonato de cálcio em águas naturais: há, nesse caso, tanto precipitação química quanto biológica desse sal, o que pode variar conforme a profundidade. Esta, por sua vez, apresenta, além da pressão hidrostática variável, uma estratificação térmica de variação sazonal.

Fenômenos biológicos, como a fotossíntese, também são fatores que afetam as concentrações de espécies químicas com a profundidade: há uma maior penetrabilidade luminosa na superfície e até certa profundidade, e uma maior taxa de decomposição da matéria orgânica no fundo, o que exerce influência direta na concentração de CO₂ e no pH do meio aquoso em diferentes profundidades de corpos d'água, como lagos, rios e o oceano.

Assim, transposições didáticas que articulem e detalhem conteúdos disponíveis em bibliografia das áreas de oceanografia química, físico-química, química ambiental, ensino de ciências e de outras áreas constituem perspectivas para o desenvolvimento de abordagens pedagógicas contextualizadas em questões que têm tido crescente reconhecimento de importância para a educação e a pesquisa mundiais.

Tais abordagens ganham ainda mais relevância diante da declaração da “Década do Oceano” pela Organização das Nações Unidas (ONU), “iniciada em 2021 e se estendendo até 2030, e que favorece as interações entre diferentes áreas das ciências na direção do gerenciamento sustentável dos oceanos abertos e regiões costeiras, trazendo benefícios para as gerações atual e futuras”¹⁵².

Sistema Carbonato e Ensino: Possibilidades Complementares

As abordagens apresentadas constituem uma parte do que pode ser trabalhado pedagogicamente utilizando o SC. Muitas abordagens adicionais podem ser feitas, por exemplo, o

efeito da temperatura no equilíbrio e na cinética das etapas envolvidas na dissolução e na desgaseificação de CO_2 em meio aquoso¹⁵⁴. Conforme a literatura^{5,7}:

Two bottles of water are carbonated, with CO_2 gas being added, under 2 atm pressure and then capped. One bottle is stored at room temperature; the other is stored in the refrigerator. When the bottle stored at room temperature is opened, large bubbles escape, along with a third of the water. The bottle stored in the refrigerator is opened without frothing or bubbles escaping. Explain⁵.

Cold drinks produce fewer bubbles than warm drinks because carbon dioxide is less soluble at higher temperature. For the same reason, warm carbonated beverages go flat faster than cold ones. You have probably noticed this effect when heating water in an open pan or beaker. Bubbles of air are driven out of the water by an increase in temperature⁷.

A questão da instabilidade e da detecção do ácido carbônico também pode ser abordada em maior profundidade, havendo revisão recente na literatura a respeito do assunto³⁹. De acordo com a literatura⁸:

Até 1993, não havia qualquer evidência de que o ácido carbônico livre tivesse sido isolado, embora seja formado um aduto de éter instável quando o HCl seco reage com o NaHCO_3 suspenso em Me_2O a 243 K, e há evidência, por espectrometria de massa, de o H_2CO_3 ser um produto da decomposição térmica do $[\text{NH}_4][\text{HCO}_3]$. No entanto, os dados de espectroscopia IV agora indicam que o H_2CO_3 pode ser isolado usando um método criogênico no qual camadas vítreas de solução de KHCO_3 (ou Cs_2CO_3) e HCl em MeOH distribuem-se umas em cima das outras a 78 K e a mistura de reação é aquecida até 300 K. Nessas condições, e na ausência de água, o H_2CO_3 pode ser sublimado sem alteração⁸.

Adicionalmente à fenomenologia ácido-base do SC, este também pode ser trabalhado didaticamente abordando-se as variações que ocorrem na condutividade em meio aquoso conforme a variação na concentração de espécies do sistema. Por exemplo, pode-se iniciar com a citação¹¹:

The conductivity of pure water, multiply distilled to remove all impurities, is about $0.043 \times 10^{26} (\Omega \text{ cm})^{-1}$. Exposed to the air, pure water dissolves CO_2 , which forms carbonic acid, H_2CO_3 ; dissociation produces H_3O^+ and HCO_3^- , which increase the conductivity to about $1 \times 10^{26} (\Omega \text{ cm})^{-1}$ ¹¹.

Os trabalhos expostos podem ser complementados por um vasto referencial que consta na literatura a respeito de muitos tópicos que podem ser incluídos no ensino utilizando experimentação pedagógica e o SC, como, por exemplo, a versatilidade do CO₂ em síntese orgânica^{155,156} e métodos analíticos para a detecção dos substratos do sistema².

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MANAHAN, S. E. Química ambiental, 9ª ed. Bookman: Porto Alegre, 2013.
2. HARRIS, D. C.; Análise Química Quantitativa, 8ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2013.
3. SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W. Química Inorgânica, 4ª ed., Bookman: Porto Alegre, 2008.
4. KOTZ, J. C.; TREICHEL, P. M.; TOWNSEND, J. Chemistry & Chemical Reactivity, 10 ed. Boston: Cengage Learning, 2019.
5. BETTELHEIM, F. A.; BROWN, W. H.; CAMPBELL, M. K.; Introduction to General, Organic and Biochemistry, 11 ed. Boston: Cengage Learning: Boston MA, 2019.
6. WHITTEN, K. W.; DAVIS, R. E.; PECK, L. *et al.* Chemistry, 10 ed., Belmont, CA: Brooks/Cole Cengage Learning, 2014.
7. MASTERTON, W. L.; HURLEY, C. N.; Chemistry: Principles and Reactions, 8 ed. Boston: Cengage Learning, 2016.
8. EBBING, D.; GAMMON, S. D.; General Chemistry, 11 ed. Boston: Cengage Learning, 2017.
9. STOKER, H. S. General, Organic, and Biological Chemistry, 7 ed. Boston: Cengage Learning, 2016.
10. SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J. *et al.* Fundamentals of Analytical Chemistry, 9 ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2015.
11. OXTOPY, D. W.; GILLIS, H. P.; BUTLER, L. J. Principles of Modern Chemistry, 8 ed. Boston: Cengage Learning, 2015.
12. ZUMDAHL, S. S.; ZUMDAHL, S. A. Chemistry: An Atoms First Approach, 2 ed., Boston, MA: Cengage Learning, 2016.
13. HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. Química Inorgânica – v. 1, 4ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2013.
14. JESPERSEN, N. D.; ALISON, H.; BRADY, J. E. Química – A Natureza Molecular da Matéria – v. 2, 7ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2013.
15. ADAMCZYK, K.; PRÉMONT-SCHWARZ, M.; PINES, D. *et al.* Ultrafast dynamics of hydrogen bonding in water. *Science*, v. 326, n. 5956, p. 1690–1694, 2009.
16. KERN, D. M. The Hydration of Carbon Dioxide. *Journal of Chemical Education*, v. 37, n. 1, p. 14, 1960.
17. VOGEL, A. I. Análise Química Quantitativa, 6ª ed. LTC: Rio de Janeiro, 2019.
18. ATKINS, P.; JONES, L.; Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente, 5ª ed., Bookman: Porto Alegre, 2012.
19. BROWN, T. L.; LEMAY JR., H. E.; BURSTEN, B. E. *et al.* Química – A Ciência Central, 13ª ed., Pearson: São Paulo, 2016.
20. BAIRD, C.; CANN, M.; Química Ambiental, 4ª ed., Bookman: Porto Alegre, 2011.
21. LEVY, J. B.; HORNACK, F. M.; LEVY, M. A. Simple Determination of Henry's Law Constant for Carbon Dioxide *Journal of Chemical Education*, v. 64, p. 260, 1987.
22. BARTET P., D. Una ilustración a microescala de la ley de Henry y del principio de Le Châtelier. *Educación Química*, v. 13, p. 244, 2002.

23. NYASULU, F.; BARLAG, R.; MCMILLS, L. *et al.* Mass-Based Approach to the Determination of the Henry's Law Constant for CO₂(g) Using a Diet Carbonated Beverage. *Journal of Chemical Education*, v. 96, n. 11, p. 2661, 2019.
24. BOWERS, P. G.; RUBIN, M. B.; NOYES, R. M. *et al.* Carbon Dioxide Dissolution as a Relaxation Process: A Kinetics Experiment for Physical Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 74, n. 12, p. 1455, 1997.
25. JONES, P.; HAGGETT, M. L.; LONGRIDGE, J. L. The Hydration of Carbon Dioxide. A double clock experiment. *Journal of Chemical Education*, v. 41, n. 11, p. 610, 1964.
26. UTGIKAR, V. P.; MACPHERSON, D.; Facilitating Conceptual Understanding of Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient through a Simple Experiment Involving Dissolution of Carbon Dioxide in Water in a Surface Aeration Reactor. *Journal of Chemical Education*, v. 93, p. 1282, 2016.
27. CHOI, M. M. F.; WONG, P. S.; Using a Datalogger to Determine First-Order Kinetics and Calcium Carbonate in Eggshells. *Journal of Chemical Education*, v. 81, p. 859, 2004.
28. KOSTER, D. F.; TRIMBLE, R. F.; Solubility of CO₂ A Variation of the Experiment Measuring Standard Molar Volume of a Gas. *Journal of Chemical Education*, v. 71, p. 528, 1994.
29. DAVIS, C. M.; MAUCK, M. C.; Titrimetric Determination of Carbon Dioxide in a Heterogeneous Sample ("Pop Rocks"). *Journal of Chemical Education*, v. 80, n. 5, p. 552, 2003.
30. LANNI, L. M.; Filling a Plastic Bag with Carbon Dioxide: A Student-Designed Guided-Inquiry Lab for Advanced Placement and College Chemistry Courses. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 9, p. 1390, 2014.
31. CACCIATORE, K. L.; SEVIAN, H.; Teaching Lab Report Writing through Inquiry: A Green Chemistry Stoichiometry Experiment for General Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 83, p. 1039, 2006.
32. FAGERLUND, J.; ZEVENHOVEN, R.; HULDÉN, S.; SÖDERGÅRD, B. Gasometric Determination of CO₂ Released from Carbonate Materials *Journal of Chemical Education*, v. 87, n. 12, p. 1372, 2010.
33. NYASULU, F.; PARIS, S.; BARLAG, R. Wash Bottle Laboratory Exercises: Mass of NaHCO₃ in a Alka-Seltzer Tablet, Molar Mass of CO₂, and the Ideal Gas Law Constant. *Journal of Chemical Education*, v. 86, n. 7, p. 842, 2009.
34. DA SILVA, R.; PIRES, M. J. R.; AZEVEDO, C. M. N. *et al.* Kit Experimental para Análise de CO₂ Visando à Inclusão de Deficientes Visuais. *Química Nova na Escola*, v. 37, n. 4, 2015.
35. KOCMUR, S.; CORTON, E.; HAIM, L. *et al.* CO₂ – Potentiometric Determination and Electrode Construction, a Hands-on Approach. *Journal of Chemical Education*, v. 76, n. 9, p. 1253, 1999.
36. DA SILVA, R.; DOS SANTOS, F. S.; PIRES, M.; Uso de Materiais Recicláveis na Determinação Gravimétrica de CO₂ no Ar Ambiente e Tratamento dos Resíduos de Laboratório Gerados. *Química Nova*, v. 35, n. 10, p. 2067, 2012.
37. PANTALEAO, I.; PORTUGAL, A. F.; MENDES, A. *Journal of Chemical Education*, v. 87, p. 1377, 2010.
38. NICHELE, A. G.; ZUCOLOTTI, A. M.; DIAS, E. C. Estudo da Solubilidade dos Gases: Um Experimento de Múltiplas Facetas. *Química Nova na Escola*, v. 37, p. 312, 2015.
39. KERBER, R. C.; Carbon Dioxide Flooding: A Classroom Case Study Derived from Surgical Practice. *Journal of Chemical Education*, v. 80, n. 12, p. 1437, 2003.
40. FERREIRA, L. H.; HARTWIG, D. H.; ROCHA-FILHO, R. C. Algumas experiências simples envolvendo o princípio de Le-Chatelier. *Química nova na Escola*, v. 5, p. 28, 1997.
41. BROWN, D. B.; MACKAY, J. A.; Le Chatelier's Principle, Coupled Equilibrium and Egg Shells. *Journal of Chemical Education*, v. 60, p. 198, 1983.

42. SHAW, C. F.; WEBB, J. W.; ROTHENBERGER, O. Using Demonstrations Involving Combustion and Acid–Base Chemistry to Show Hydration of Carbon Dioxide, Sulfur Dioxide, and Magnesium Oxide and Their Relevance for Environmental Climate Science. *Journal of Chemical Education*, v. 93, p. 2063, 2016.
43. BOZLEE, B. J.; JANEBO, M.; JAHN, G.; A Simplified Model to Predict the Effect of Increasing Atmospheric CO₂ on Carbonate Chemistry in the Ocean. *Journal of Chemical Education*, v. 85, n. 2, p. 213, 2008.
44. PERERA, A. P.; BOPEGEDERA, A. M. R. P. Laboratory Experiment Investigating the impact of Ocean Acidification on Calcareous Organisms. *Journal of Chemical Education*, v. 91, p. 1951, 2014.
45. POWERS, D. C.; HIGGS, A. T.; OBLEY, M. L. *et al.* Analysis of Natural Buffer Systems and the Impact of Acid Rain: An Environmental Project for First-Year Chemistry Students. *Journal of Chemical Education*, v. 82, n. 2, p. 274, 2005.
46. BUTH, J. M.; Ocean Acidification: Investigation and Presentation of the Effects of Elevated Carbon Dioxide Levels on Sea water Chemistry and Calcareous Organisms. *Journal of Chemical Education*, v. 93, p. 718, 2016.
47. BELL, J. A.; Every Year Begins a Millennium. *Journal of Chemical Education*, v. 77, n. 9, p. 1098, 2000.
48. SILVA, L. A.; CARVALHO, L. S.; LOPES, W. A. *et al.* Solubilidade e Reatividade de Gases. *Química Nova*, v. 40, p. 824, 2017.
49. SANGER, M. J. Using Archimedes' Principle To Explain Floating and Sinking Cans. *Journal of Chemical Education*, v. 88, n. 3, p. 272, 2011.
50. CAVAGIS, A. D. M.; PEREIRA, E. A.; DE OLIVEIRA, L. C.; Um Método Simples para Avaliar o Teor de Sacarose e CO₂ em Refrigerantes. *QNEsc*, V, 36, p. 241, 2014.
51. FERREIRA, L. H.; HARTWIG, D. R.; DE OLIVEIRA, R. C. Variação de pH em Água Mineral Gaseificada. *Química Nova na Escola*, v. 30, p. 312, 2008.
52. JENSEN, W. B.; The Importance of Kinetic Metastability: Some Common Everyday Examples. *Journal of Chemical Education*, v. 92, n. 4, p. 649, 2015.
53. BROOKER, M. H.; Soda Water, Supercooling or Freezing Point Depression? *Journal of Chemical Education*, v. 71, n. 10, p. 903, 1994.
54. DE GRYS, H.; Determining the Pressure inside na Unopened Carbonated Beverage *Journal of Chemical Education*, v. 84, n. 7, p. 1117, 2007.
55. ROHRIG, B. Fizzy Drinks: Stoichiometry You Can Taste. *Journal of Chemical Education*, v. 77, n. 12, p. 1608a, 2000.
56. GLASSER, L.; Determining the Pressure inside na Intact Carbonated Beverage Can. *Journal of Chemical Education*, v. 85, p. 47, 2008.
57. BARE, W. D.; Freezing Point Depression in a Bottle of Soda. *Journal of Chemical Education*, v. 68, n. 12, p. 1038, 1991.
58. KUNTZLEMAN, T. S.; DAVENPORT, L. S.; COTHRAN, V. I. *et al.* New Demonstrations and New Insights on the Mechanism of the Candy-Cola Soda Geyser. *Journal of Chemical Education*, v. 94, n. 3, p. 569, 2017.
59. BARE, W. D.; GOLDSBY, K. A.; DUFFY, D. Q. *et al.* More Chemistry in a Soda Bottle: a Conservation of Mass Activity. *Journal of Chemical Education*, v. 72, n. 8, p. 734, 1995.

60. DELORENZO, R.; From Chicken Breath to the Killer Lakes of Cameroon: Uniting Seven Interesting Phenomena with a Single Chemical Underpinning. *Journal of Chemical Education*, v. 78, n. 2, p. 191, 2001.
61. SNYDER, C. A.; SNYDER, D. C. Simple Soda Bottle Solubility and Equilibria. *Journal of Chemical Education*, v. 69, n. 7, p. 573, 1992.
62. KUNTZLEMAN, T. S.; RICHARDS, C.; Another Method for Determining the Pressure inside an Intact Carbonated Beverage Can or Bottle. *Journal of Chemical Education*, v. 87, n. 9, p. 992, 2010.
63. BUTLER, J. K.; Carbonated Beverages and Frozen Stopcocks. *Journal of Chemical Education*, v. 64, n. 10, p. 896, 1987.
64. SANGER, M. J.; HUMPHREYS, T. C.; LAPORTE, M. M. Using Soda Cans to Teach Physical Science Students about Density. *Journal of Chemical Education*, v. 86, n. 2, p. 209, 2009.
65. JACOBSEN, E. K.; PAULSON, D. R.; SANGER, M. J. Soda Can Density and Unexpected Results. *Journal of Chemical Education*, v. 85, n. 1, p. 18, 2008.
66. LIMA, A. C. S.; AFONSO, J. C. A Química do Refrigerante. *Química Nova na Escola*, v. 31, n. 3, p. 210, 2009.
67. EICHLER, J. F.; Imploding Soda Cans: From Demonstration to Guided-Inquiry Laboratory Activity. *Journal of Chemical Education*, v. 86, p. 472, 2009.
68. PATRICK, H.; HARMON, B.; COONCE, J. *et al.* Mentos and the Scientific Method: A Sweet Combination. *Journal of Chemical Education*, v. 84, n. 7, p. 1120, 2007.
69. LINTHORST, J. A.; VAN DER WAL-VEUGER, J. *Journal of Chemical Education*, v. 95, p. 1612, 2018.
70. BAUR, J. E.; BAUR, M. B.; FRANZ, D. A.; The Ultrasonic Soda Fountain: A Dramatic Demonstration of Gas Solubility in Aqueous Solutions. *Journal of Chemical Education*, v. 83, n. 4, p. 577, 2006.
71. KUNTZLEMAN, T. S.; NYDEGGER, M. W.; BROOKE, S. *et al.* Tribonucleation: A New Mechanism for Generating the Soda Geyser. *Journal of Chemical Education*, v. 95, n. 8, p. 1345, 2018.
72. DEAMER, D. W.; SELINGER, B. K.; Will that pop bottle really go pop? An equilibrium question. *Journal of Chemical Education*, v. 65, n. 6, p. 518, 1988.
73. VAN NATTA, S.; KNIPP, R.; WILLIAMS, J. P. The Fizz-Keeper: A Useful Science Tool. *Journal of Chemical Education*, v. 82, n. 10, p. 1454, 2005.
74. MELKELBURG, C. R.; SZCZEPANKIEWICZ, S. H.; HELLERER, M. Another Look at the Fizz Keeper: A Case-Study Laboratory Exercise for High School Students *Journal of Chemical Education*, v. 87, n. 7, p. 705, 2010.
75. HOWALD, R. A.; The Fizz Keeper, a Case Study in Chemical Education, Equilibrium, and Kinetics. *Journal of Chemical Education*, v. 76, n. 2, p. 208, 1999.
76. HUBER, C. J.; MASSARI, A. M.; Quantifying the Soda Geyser. *Journal of Chemical Education*, v. 91, n. 3, p. 428, 2014.
77. SOLTZBERG, L. J.; BOWERS, P. G.; HOFSTETTER, C.; A Computer Model for Soda Bottle Oscillations: "The Bottelator". *Journal of Chemical Education*, v. 74, n. 6, p. 711, 1997.
78. LEÓN-OLIVARES, F.; GUTIÉRREZ-RODRÍGUEZ, A.; PALACIOS-ALQUISIRA, J. PET, Poli (tereftalato de etileno), material clave para la fabricación de envases de bebidas carbonatadas. *Educación Química*, v. 13, n. 1, p. 28, 2002.

79. KUNTZLEMAN, T. S.; JOHNSON, R. Probing the Mechanism of Bubble Nucleation in and the Effect of Atmospheric Pressure on the Candy-Cola Soda Geyser. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 4, p. 980, 2020.
80. KUNTZLEMAN, T. S.; ANNIS, J.; ANDERSON, H. *et al.* Kinetic Modeling of and Effect of Candy Additives on the Candy-Cola Soda Geyser: Experiments for Elementary School Science through Physical Chemistry. *Journal of Chemical Education*, v. 97, n. 1, p. 283, 2020.
81. HIPOLITO-NÁJERA, A. R.; MOYA-HERNANDEZ, M. R.; GOMEZ-BALDERAS, R. *et al.* Introduction to Validation of Analytical Methods: Potentiometric Determination of CO₂. *Journal of Chemical Education*, v. 94, n. 9, p. 1303, 2017.
82. PINO, H.; PASTOR, V.; GRIMALT-ÁLVARO, C. *et al.* *Journal of Chemical Education*, v. 96, p. 377, 2019.
83. PIRES, D. A. T.; MACHADO, P. F. L. *Química Nova na Escola*, v. 35, p. 166, 2012.
84. CORREIA, P. R. M.; FERREIRA, M. M. C.; *Química. Nova*, v. 30, p. 481, 2007.
85. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. Joseph Priestley and the Discovery of Oxygen. *Chemistry for Life*. Disponível em: <https://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/josephpriestleyoxygen.html>. Acesso em: 20 set. 2025.
86. CAMPBELL, W. A.; Joseph Priestley's soda water. *Endeavour*, v. 7, p. 141, 1983.
87. WILLIAMS, K. R. The Discovery of Oxygen and Other Priestley Matters. *Journal of Chemical Education*, v. 80, p. 1129, 2003.
88. MILLE, F. A.; Joseph Priestley, preeminent amateur chemist. *Journal of Chemical Education*, v. 64, n. 9, p. 745, 1987.
89. WEST, J. B. Joseph Black, carbon dioxide, latent heat, and the beginnings of the Discovery of the respiratory gases. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, v. 306, p. L1057, 2014.
90. WEST, J. B. Henry Cavendish (1731–1810): hydrogen, carbon dioxide, water, and weighing the world. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, v. 307, n. 1, p. L1, 2014.
91. SPRIGGE, J. S. Sir Humphry Davy; his researches in respiratory physiology and his debt to Antoine Lavoisier. *Anaesthesia*, v. 57, n. 4, p. 357-364, 2002.
92. WOLF, A.; BRAY, G. A.; POPKIN, B. M. A short history of beverages and how our body treats them. *Obesity Reviews*, v. 9, p. 151, 2008.
93. DUNKEL, A.; HOFMANN, T.; Carbonic Anhydrase IV Mediates the Fizz of Carbonated Beverages. *Angewandte Chemie*, v. 49, p. 2975, 2010.
94. PIZZORNO, J. Glutathione! *Integrative Medicine*, v. 13, n. 1, p. 8, 2014.
95. SILVERTHORN, D. U. *Fisiologia Humana: Uma Abordagem Integrada*, 7ª ed. Artmed: Porto Alegre, 2017.
96. SANT'ANA, A. S.; SILVA, S. C. F. L.; FARANI, I. O. JR. *et al.* Qualidade microbiológica de águas minerais. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, v. 23, Supl., p. 190, 2003.
97. BJERRUM PLOT. Wikipedia. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Bjerrum_plot. Acesso em: 07 set. 2025.
98. DO LAGO, C. L. A History Of Carbonic Acid and the Central Role Of Bicarbonate in the CO₂/H₂O System. *Química Nova*, v. 47, n. 8, p. 1-7, 2024.

99. SANDER, R. Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Katlenburg-Lindau, v. 15, p. 4399, 2015.
100. ATKINS, P.; DE PAULA, J.; *Físico-Química*, v. 1, 10ª ed. LTC: Rio de Janeiro, 2018.
101. LEWIS, R.; EVANS, W. *Química*, 4ª ed., LTC: Rio de Janeiro, 2014.
102. CARROLL, J. J.; HENRY'S L. A Historical View. *Journal of Chemical Education*, v. 70, n. 2, p. 91, 1993.
103. ROSENBERG, R. M.; PETICOLAS, W. L. Henry's Law: A Retrospective. *Journal of Chemical Education*, v. 81, n. 11, p. 1647, 2004.
104. KOWALTOWSKI, A. O que é metabolismo? Como nossos corpos transformam o que comemos no que somos. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
105. MARQUES, A. J.; FILGUEIRAS, C. A. L. *Química. Nova*, v. 33, p. 1612, 2010.
106. SICCA, N. A. L.; GONÇALVES, P. W. *Química Nova*, v. 25, p. 689, 2002.
107. HERSHEY, D. R. Digging Deeper into Helmont's Famous Willow Tree Experiment. *The American Biology Teacher*, v. 53, n. 8, p. 458-460, 1991.
108. GALVEZ, M. E.; GAILLARDET, J. Historical constraints on the origins of the carbon cycle concept. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 344, n. 11-12, p. 549-567, 2012.
109. CHEN, W-Q; GRAEDEL, T. E. Anthropogenic cycles of the elements: a critical review. *Environ. Sci. Technol.*, v. 46, n. 16, p. 8574-8586, 2012.
110. WEST, J. B. Joseph Black, carbon dioxide, latent heat, and the beginnings of the Discovery of the respiratory gases. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, v. 306, p. L1057-1063, 2014a.
111. MAAR, J. H. *História da Química – segunda parte: de Lavoisier ao sistema periódico*. Florianópolis: Papalivro, 2011.
112. WEST, J. B. Henry Cavendish (1731–1810): hydrogen, carbon dioxide, water, and weighing the world. *American Journal of Physiology. Lung Cellular and Molecular Physiology*, v. 307, p. L1-L6, 2014b.
113. SPRIGGE, J. S. Sir Humphry Davy; his researches in respiratory physiology and his debt to Antoine Lavoisier. *Anaesthesia*, v. 57, n. 4, p. 357-364, 2002.
114. STEVE'S BLOG. Who first coined the term "Greenhouse Effect"? Disponível em: www.easterbrook.ca/steve/2015/08/who-first-coined-the-term-greenhouse-effect/. Acesso em: 27 jul. 2021.
115. FLEMING, J. R. Joseph Fourier, the "greenhouse effect", and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures. *Endeavour*, v. 23, n. 2, p. 72-75, 1999.
116. TYNDALL, J. The Bakerian Lecture – On the absorption and radiation of heat by gases and vapours, and on the physical connexion of radiation, absorption, and conduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 36, p. 1511, 1861.
117. HUDDLESTON, A. Happy 200th birthday to Eunice Foote, hidden climate science pioneer. [S.l.]: [s.n.], jul. 2019.
118. POUILLET, C. Biography: Claude Pouillet. HandWiki, 2021. Disponível em: https://handwiki.org/wiki/Biography:Claude_Pouillet. Acesso em: 27 jul. 2021.

119. SORENSON, R. P. Eunice Foote's pioneering research on CO₂ and climate warming: update. Search and Discovery, Article nº 70317, 2018.
120. SORENSON, R. P. Eunice Foote's pioneering research on CO₂ and climate warming. Search and Discovery, Article nº 70092, 2011.
121. ANDERSON, T. R.; HAWKINS, E.; JONES, P. D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, v. 40, n. 3, p. 178-187, 2016.
122. FLEMING, J. R. The callendar effect: the life and work of guy stewart callendar (1898–1964), the scientist who established the carbon dioxide theory of climate change. Boston: American Meteorological Society, 2007.
123. FLEMING, J. R.; SCHMIDT, G.; PLASS, G. N. Carbon Dioxide and the Climate. *American Scientist*, v. 98, n. 1, p. 58, 2010.
124. REVELLE, R.; SUESS, H. Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus*, v. 9, n. 1, p. 18-27, 1957.
125. ARCHER, D.; *Global Warming*. 2 ed. Hoboken: Wiley, 2011.
126. LENZI, E.; FAVERO, L. B. *Introdução à Química da Atmosfera – Ciência, Vida e Sobrevivência*. Editora LTC, 2019.
127. NASA – Earth Observatory. The Carbon Cycle. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle#:~:text=Carbon%20flows%20between%20each%20reservoir,in%20warmer%20temperatures%20on%20Earth>. Acesso em: 12 set. 2025.
128. MCKINLEY OCEAN CARBON GROUP. Carbon and Climate Basic information on the major components of the global carbon cycle. Disponível em: galenmckinley.github.io/CarbonCycle/. Acesso em: 22 abr. 2021.
129. FLEMING, J. R.; SCHMIDT, G.; PLASS, G. N. Carbon Dioxide and the Climate. *Revista American Scientist*, v. 44, p. 302–316, 1956.
130. KELLOGG, L. H.; TURCOTTE, D. L.; LOKAVARAPU, H. On the Role of the Urey Reaction in Extracting Carbon From the Earth's Atmosphere and Adding It to the Continental Crust. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, v. 6, art. 62, 2019.
131. MARTINS, C. R.; PEREIRA, P. A. P.; LOPES, W. A. *et al.* Ciclos Globais do Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a Importância na Química da Atmosfera. *Química Nova na Escola*. (Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola), v. 5, p. 28, 2003.
132. MIDDELBURG, J. J.; SOETAERT, K.; HAGENS, M. Ocean Alkalinity, Buffering and Biogeochemical Processes. *Review of Geophysics*, v. 58, n. 3, 2020.
133. REES, J. Bio-oceanography. *Nature*, v. 437, p. 335, 2005.
134. GATUSO, J.; HANSSON, L. *Ocean Acidification*, 1ª ed. Oxford: Oxford University Press, 2011.
135. ORR, J. C.; FABRY, V. J.; AUMONT, O. *et al.* Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, v. 437, p. 681–686, 2005.
136. LIBES, S. *Introduction to Marine Biogeochemistry*. 2ª ed. Oxford: Elsevier Academic Press, 2009.
137. MILLERO, F. J. *Chemical Oceanography*, 4ª ed. Florida: CRC Press, 2013.

138. WILLIAMS, R. G.; FOLLOWS, M. J. Ocean dynamics and the Carbon Cycle Principles, Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
139. EMERSON, S.; Chemical Oceanography and the Marine Carbon Cycle, Cambridge University Press: Cambridge, 2008.
140. WEBB, PAUL. Introduction to Oceanography. Aug. 2021. Disponível em: <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>. Acesso em: 27 jul. 2021.
141. GIRARD, J. Princípios de Química Ambiental. 2ª ed. LTC: Rio de Janeiro: 2016.
142. SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. Química Ambiental, 2ª edição. Prentice Hall, 2009.
143. MIDDELBURG, J. Marine Carbon Biogeochemistry: a Primer for Earth System Scientists. Springer Cham, 2019.
144. SOUZA, M. F. L.; LONGHINI, C. M.; SILVA, A. M. *et al.* Ciclo do Carbono: Processos Biogeoquímicos, Físicos e Interações entre Compartimentos na Baía de Todos os Santos. Revista Virtual de Química, Rio de Janeiro, v. 4, n. 5, p. 566-582, 2012.
145. COYNE, L. Chemistry in natural water systems: A general discussion. Journal of Chemical Education, v. 52, n. 12, p. 796, 1975.
146. WANG, Z.; LI, X.; SONG, J. *et al.* A new indicator can assess absorption capacity for carbon dioxide and ocean acidification. Commun Earth Environ, v. 6, p. 401, 2025.
147. DONEY, S. C.; FABRY, V. J.; FEELY, R. A. *et al.* Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. Annual Review of Marine Science, v. 1, p. 169-192, 2009.
148. VOPEL, K.; MARSHALL, A.; BRANDT, S. *et al.* Biogeochemical feedbacks to ocean acidification in a cohesive photosynthetic sediment. Scientific Reports, v. 11, p. 22867, 2021.
149. WALLACE, W. J. The Development of Marine Chemistry until 1900. In: Sears M., Merriman D. (eds) Oceanography: The Past. Springer, New York, NY, 1980.
150. DEACON, G. E. R. Progress in Oceanographical Research. Journal of Navigation, v. 5, n. 2, p. 168-173, 1952.
151. BADOCCO, D.; PEDRINI, F.; PASTORE, A. *et al.* Use of a simple empirical model for the accurate conversion of the seawater pH value measured with NIST calibration into seawater pH scales. Talanta, v. 1, n. 225, p. 122051, 2021.
152. MORTON, S. D.; LEE, G. F.; Calcium Carbonate Equilibria in lakes. Journal of Chemical Education, v. 45, n. 8, p. 513, 1968.
153. CÁTEDRA UNESCO PARA A SUSTENTABILIDADE DO OCEANO. Conheça a Década. Disponível em: <https://catedraoceano.iea.usp.br/decadadooceano/>. Acesso em: 18 set. 2025.
154. MARQUES, C. P. Experimentação pedagógica com água mineral e o sistema carbonato. 128 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2023.
155. LIU, Q.; WU, L.; JACKSTELL, R. *et al.* Using carbon dioxide as a building block in organic synthesis. Nature Communications, v. 6, art. 5933, 2015.
156. SABLE, D. A.; VADAGAONKAR, K. S.; KAPDI, A. R. *et al.* Carbon dioxide based methodologies for the synthesis of fine chemicals. Organic Biomolecular Chemistry, Cambridge, v. 19, p. 5725-5757, 2021.

ÍNDICE REMISSIVO

Abordagem Didática	1
Biogeoquímica	20
Ciclo do Carbono	20
Educação Química	8
Ensino	20
Experimentação no Ensino	8
Pensamento Sistêmico.....	1
Sistema Terra	1
Teoria e Experimentação	8