SCIENTIA NATURALIS
Scientia Naturalis, v. 7, n. 2, p. 596-628, 2025
Home page: http://revistas.ufac.br/revista/index.php/SciNat
DOI: https://doi.org/10.29327/269504.7.2-11
ISSN 2596-1640

Identificação de cátions em meio aquoso sob a perspectiva da Química Verde

Francisnara Tonholi[1], Letícia Poggere Pinto[1], Lucas Emanoel do Nascimento Aquino[2*], Cândida Alíssia Brandl[2], Edneia Durli Giusti[2], Marilei Casturina Mendes Sandri[3], Sandra Inês Adams Angnes Gomes[2]

[1]Mestre em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, Pato Branco, Paraná, Brasil. [2]Professor(a) do Instituto Federal do Paraná, Colegiado de Química, Palmas, Paraná, Brasil. [3]Professora da Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Química, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. *lucas.aquino@ifpr.edu.br

Recebido em: 14/11/2024 **Aceito em: 07/11/2025** **Publicado em: 30/12/2025**

DOI: https://doi.org/10.29327/269504.7.2-11

RESUMO

A Química Analítica é o ramo da Química que atua na separação, identificação e determinação quantitativa e qualitativa dos componentes de uma amostra através do desenvolvimento de métodos e procedimentos. Atuando nessa área, este trabalho foi desenvolvido para propor a diminuição dos resíduos químicos gerados em práticas de laboratório e minimizar a quantidade de reagentes utilizados nas aulas experimentais durante a identificação dos cátions dos grupos I, II, III, IV e V. Como metodologia, empregou-se a métrica holística Estrela Verde e seus critérios para avaliação da verdura química de cada um dos grupos. Os resultados apresentados neste trabalho permitem perceber que a análise de verdura química de uma reação por meio da métrica Estrela Verde promove o resgate da Química Analítica de modo a minimizar e reduzir o excesso de reagentes e a produção de resíduos e possibilitando a realização de técnicas mais sustentáveis.

Palavras-Chave: Química Analítica. Elementos potencialmente tóxicos. Estrela Verde.

Identification of cations in aqueous medium from the Green Chemistry perspective

ABSTRACT

Analytical Chemistry is the branch of Chemistry that deals with the separation, identification and quantitative and qualitative determination of the components of a sample by means of the development of methods and procedures. Working with this area of knowledge, this work was developed with the aim of proposing the reduction of chemical waste generated in laboratory practices and minimizing the amount of reactants used in experimental classes during the identification of cations from the groups I, II, III, IV and V. As a methodology, the holistic metric Green Star and its criteria to evaluate the chemical greenness were used for each group. The results reported in this work allow us to realize that the analysis of the chemical greenness of a reaction using the Green Star metric promotes the recapitulation of Analytical Chemistry in order to minimize and reduce the excess of reactants and the production of waste and enabling the implementation of more sustainable techniques.

Keywords: Analytical Chemistry. Potentially toxic elements. Green Star.

INTRODUÇÃO

A Química Analítica é uma Ciência de medição que consiste em um conjunto de ideias e métodos poderosos e úteis em todos os campos da Ciência e medicina. Esta Ciência contribui significativamente com o desenvolvimento tecnológico e científico, sendo amplamente empregada na indústria, na medicina e em todas as outras Ciências (SKOOG et al., 2006).

A análise química pode ser definida como a aplicação de um processo ou de uma série de processos para identificar ou quantificar uma substância, os componentes de uma mistura, ou ainda para determinar a estrutura de compostos químicos (VOGEL, 2017). De acordo com Vogel (2017), esses processos analíticos são muito simples em comparação com alguns métodos mais complexos e que só podem ser executados com o uso de instrumentos modernos, porém nem sempre é necessário usar procedimentos instrumentais avançados para executar análises acuradas e, muitas vezes, análises simples e rápidas são mais desejáveis do que processos mais complicados e demorados.

Existem dois tipos de análises: a Análise Química Quantitativa, que determina as quantidades relativas das espécies, ou analitos em termos numéricos, e a Análise Química Qualitativa, que estabelece a identidade química das espécies presentes em uma amostra (SKOOG et al., 2006). As medidas analíticas desempenham um papel fundamental em muitas áreas de pesquisa, dando destaque à Química, Bioquímica, Biologia, Geologia, Física e outras áreas da Ciência.

Segundo Vogel (1981), a análise qualitativa pode ser conduzida em várias escalas. Em macroanálise, a quantidade de substância empregada é de 0,5 a 1 grama e o volume de solução tomado para análise é cerca de 20 mL. Na semimicroanálise, a quantidade de analito é reduzida por um fator de 0,1 a 0,5 gramas, para isso são tomados 0,05 gramas de amostra e o volume em torno de 1 mL de solução. Para microanálise, o fator é da ordem de 0,01 gramas ou menos. A escala semimicro apresenta vantagens importantes que incluem: consumo reduzido de substâncias químicas com economia no orçamento do laboratório; maior velocidade da análise devido ao trabalho com menores quantidades de materiais; eficiência de separação aumentada; redução considerável na quantidade de sulfeto de hidrogênio; economia de espaço nas prateleiras e armários e o treinamento na manipulação de pequenas quantidades de material (VOGEL, 1981).

Em 1957, Frederick C. Strong III sugeriu a necessidade de um novo curso de Química Analítica Qualitativa, que deveria ensinar, dentro do possível, os princípios

básicos das técnicas instrumentais, utilizando alguma atividade prática para isso (STRONG, 1957). Nesse contexto, Henry Freiser criou uma disciplina de química analítica com ênfase nos métodos de separação e não na detecção dos íons (FREISER, 1957). Algumas décadas depois, outros pesquisadores e educadores não se mostraram favoráveis a essa nova perspectiva (ALVIM; ANDRADE, 2006).

Nesse cenário, mundialmente, a disciplina de Química Analítica Qualitativa Inorgânica foi desaparecendo dos currículos das instituições de Ensino Superior americanas, que passaram a incluir parte das suas atividades de laboratório na disciplina de Química Geral (ALVIM; ANDRADE, 2006). Nesses casos, houve uma redução da carga horária destinada às atividades experimentais e a supressão da parte teórica específica da análise qualitativa, especialmente os equilíbrios químicos. Vários artigos e opiniões foram publicados sobre esse assunto, citando como principal motivo para a supressão da disciplina de qualitativa que os processos analíticos ali ensinados não tinham valor prático real (ALVIM; ANDRADE, 2006).

Henry Taube, que recebeu o Prêmio Nobel de Química de 1983, considerou um erro o desaparecimento da análise qualitativa dos currículos das universidades norte-americanas, porque esta disciplina constituía um meio de introduzir a química descritiva e de motivar os discentes a estudarem as reações químicas que, no seu ponto de vista, "são o coração da química" (ALVIM; ANDRADE, 2006). Segundo Calefi (2010), essa afirmação foi motivo de muita polêmica na época de sua publicação e oxigenou a discussão sobre a necessidade de manter a Química Analítica Qualitativa nos cursos de Química no Brasil e no exterior.

No Brasil, esse conjunto de conhecimentos ainda é tido como relevante dentro do Ensino da Química e merecedor de uma disciplina específica de Química Analítica para ministrá-lo (ALVIM; ANDRADE, 2006). Isto indica que os métodos químicos de análise qualitativa inorgânica e seus fundamentos teóricos são considerados conhecimentos necessários aos estudantes do país, pois os cursos de Química dedicam uma carga horária significativa a essa disciplina. De fato, a importância da disciplina de Química Analítica Qualitativa fica evidente quando é observado que várias reações empregadas nas práticas experimentais são fundamentais para vários métodos quantitativos de referência, empregados em diversos laboratórios. Além disso, testes qualitativos são empregados rotineiramente no controle de qualidade de fármacos e outros materiais. E, ao mesmo tempo, a análise qualitativa inclui inúmeros métodos

modernos, tais como espectrométricos, cromatográficos e nucleares, e os métodos clássicos.

Entretanto, a Química Analítica Qualitativa Experimental faz o uso de elementos potencialmente tóxicos em meio aquoso para identificação e/ou separação que podem causar danos à saúde e ao ambiente quando descartados de forma inapropriada. Nos últimos anos cresceu, a nível mundial, a conscientização por parte das indústrias químicas, das instituições acadêmicas e dos órgãos governamentais a respeito da necessidade de um tratamento eficaz ou de uma adequada disposição final de qualquer tipo de resíduo (AMARAL et al., 2001; MACHADO, 2014). Sempre que possível, existe um empenho na recuperação dos resíduos gerados por vários tipos de processos, objetivando torná-los úteis novamente, seja através da reutilização no mesmo processo ou como matéria-prima para outros processos (AMARAL et al., 2001; MACHADO, 2014). Por outro lado, as indústrias estão gradualmente trocando processos tradicionais por tecnologias limpas (AMARAL et al., 2001).

A prevenção da poluição é a mais alta forma de proteção ambiental. Se a redução da fonte geradora não é possível, então a poluição deve ser reciclada de maneira ambientalmente segura. Se a reciclagem também não for possível, então a poluição deve ser evitada, com modificação metodológica do processo analítico (NOGUEIRA, 2003). As Universidades, como instituições responsáveis pela formação de seus estudantes e, consequentemente, pelo seu comportamento como cidadãos do mundo, devem também estar conscientes e preocupadas com este problema. As atividades de laboratório realizadas, seja em aulas experimentais ou atividades de pesquisa, geram resíduos que podem oferecer riscos ao meio ambiente ou à saúde (ABREU, 2003).

É nesse contexto que surgiu a Química Verde (QV), área de estudo que se caracteriza pelo uso de técnicas e metodologias que reduzem ou eliminam o uso ou geração de produtos, subprodutos, solventes e reagentes que são nocivos aos seres humanos e/ou ao ambiente (TIEZZI, 1988). Para atingir o seu propósito, a QV utiliza métricas capazes de aferir quão verde é um determinado procedimento. Do conjunto de métricas que podem ser elencadas, a Estrela Verde (EV) é uma das mais indicadas para se trabalhar no ensino de Química, uma vez que ela é classificada como uma métrica holística, buscando analisar os fenômenos em sua totalidade, de fácil aplicação e compreensão (MACHADO, 2014).

Com o advento da QV, diversos esforços têm sido realizados com o intuito de

reduzir ou eliminar a produção de resíduos tóxicos em análises químicas sem que a eficiência dos procedimentos seja prejudicada (GAMA, 2019). Esses esforços são agrupados no que pode ser chamado de Química Analítica Verde (QAV) (ARMENTA et al., 2008). A QAV é apontada por Kurowska-Susdorf (2018) como tendo uma responsabilidade social, uma vez que ela fornece dados, informação e conhecimento capaz de influenciar em decisões políticas, com o potencial de afetar cada elemento da realidade que nos rodeia.

No contexto educacional, Magrin e Lima (2019) desenvolveram um trabalho em que os princípios da QV são aplicados a procedimentos realizados nas aulas de componentes curriculares da área de Química Analítica em um curso de formação de professores de Química. Esses princípios foram aplicados por meio da construção da EV, de sua análise e da análise do Índice de Preenchimento da Estrela (IPE), com o intuito de se realizar proposições de alterações nos procedimentos para ser alcançada uma maior verdura.

Nesse sentido, o presente trabalho busca seguir essa mesma linha, demonstrando como a EV pode ser utilizada para a inserção dos princípios da QV na formação de professores, promovendo-se uma maior conscientização quanto à responsabilidade social da Química Analítica, ao mesmo tempo em que é realizado um resgate da química clássica descritiva, propondo-se o resgate das reações de análise qualitativa sob perspectiva da QV.

METODOLOGIA

Avaliação da verdura química por meio da Estrela Verde

A EV é uma métrica holística que analisa dada situação concreta, em que cada ponta da estrela corresponde a um dos princípios da QV, e o seu respectivo comprimento é proporcional ao grau de seu cumprimento. Portanto, quanto maior e mais verde for a estrela, maior é a verdura química (MACHADO, 2014).

A construção da EV é feita por meio de um gráfico "radar", no qual as cores verde/vermelha de cada ponta da estrela representam o grau de cumprimento de cada princípio da QV. A classificação de 1 a 3 exige que se comece por definir critérios tão claros e objetivos quanto possível, com respeito a cada princípio, que poderão variar conforme a natureza das situações a serem avaliadas (MACHADO, 2014). Quando a avaliação não puder ser feita, por exemplo, por falta de dados, ou os resultados forem

duvidosos, atribui-se o valor 1, o que significa aplicar o princípio da precaução. Os critérios e pontuações utilizados para cada princípio da QV estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Pontuações para construção da EV.

Princípios	Pontuação	Critérios
P1 – Prevenção	3	Todos os resíduos inócuos
	2	Resíduos com risco moderado para a saúde e ambiente, pelo menos para uma substância, sem substâncias com risco elevado
	1	Pelo menos um resíduo com risco elevado para a saúde e ambiente
P2 - Economia Atômica	3	Reações sem reagentes em excesso (≤ 10%) e sem formação de coprodutos
	2	Reações com reagentes em excesso (> 10%) e sem formação de coprodutos
	1	Reações com reagentes em excesso (> 10%) e com formação de coprodutos
P3 - Síntese menos perigosas	3	Todas as substâncias inócuas
	2	Substâncias com risco moderado para a saúde e ambiente (pelo menos para uma substância, sem substâncias com risco elevado)
	1	Pelo menos uma substância com risco elevado para a saúde e ambiente
P5 – Solventes mais seguros	3	Não se usam solventes e substâncias auxiliares ou são inócuas
	2	Solventes e substâncias auxiliares com risco moderado para a saúde e ambiente (pelo menos para uma substância, sem substâncias com risco elevado)
	1	Pelo menos uma solvente/substância auxiliar com risco elevado para a saúde e ambiente
P6 – Eficiência Energética	3	Temperatura e pressão ambientais
	2	Pressão ambiental e temperatura entre 0 °C e 100 °C com aquecimento ou arrefecimento
	1	Pressão diferente da ambiental e/ou temperatura muito afastada da ambiental
P7 – Uso de matérias-primas renováveis	3	Todos os reagentes/matérias-primas/recursos renováveis
	2	Pelo menos um dos reagentes/matérias-primas/recursos renováveis, água ignorada
	1	Nenhum dos reagentes/matérias-primas/recursos renováveis, água ignorada
P8 - Redução de derivatizações	3	Não se usam derivatizações
	2	Usa-se apenas uma derivatização ou operação semelhante
	1	Usam-se várias derivatizações ou operações semelhantes
P9 – Catalisadores	3	Não se usam catalisadores ou os catalisadores são inócuos
	2	Catalisadores com risco moderado para a saúde e ambiente
	1	Catalisadores com risco elevado para saúde e ambiente
P10 - Planificação para degradação	3	Todas as substâncias degradáveis com produtos de degradação inócuos
	2	Todas as substâncias não degradáveis tratadas a produtos inócuos
	1	Pelo menos uma substância não degradável nem tratada a produtos inócuos
P12 – Química Segura	3	Substâncias com baixo risco de acidente químico
	2	Substâncias com risco moderado de acidente químico
	1	As substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico (considerando os perigos para a saúde e perigos físicos)

Fonte: Machado (2014).

Após definir a pontuação de acordo com cada critério e princípio da QV, é possível calcular o Índice de Preenchimento da Estrela (IPE), parâmetro numérico que permite quantificar o grau de verdura de um procedimento. O IPE é calculado pela seguinte equação (RIBEIRO; MACHADO, 2008):

$$IPE = \frac{P_{Total} - n}{P_{Máx} - P_{Mín}} \times 100$$

Nessa equação, P_{Total} é a pontuação total da prática, n o número de princípios pontuados, $P_{Máx}$ a pontuação máxima da estrela, e $P_{Mín}$ a pontuação mínima.

A EV é uma ferramenta de avaliação da verdura química que envolve aferição em vários níveis quanto a cada um dos doze princípios em jogo. No entanto, tem de se manter constante a escala de avaliação dos diversos princípios para que se possa comparar avaliações paralelas sobre alternativas diferentes. Por outro lado, a precisão com que se consegue fazer a avaliação varia de princípio para princípio e, para os princípios que envolvem a avaliação de riscos, não se consegue precisão muito elevada, o que faz com que o número de níveis seja limitado (MACHADO, 2014). Apesar de a estrela não ter resultados muito precisos, ela apresenta como vantagens a fácil visualização, devido à sua representação gráfica, que permite uma comparação visual e imediata da verdura química (MACHADO, 2014; DUARTE et al., 2015).

Para a construção da EV neste trabalho, utilizou-se a plataforma online http://educa.fc.up.pt/avaliacaoverdura (RIBEIRO; MACHADO, 2008), que permite a inserção dos dados do experimento e que constrói a EV em um gráfico radial conforme o número de princípios considerados (MACHADO, 2014). Disponível gratuitamente pela Universidade do Porto, de Portugal, esta plataforma faz o uso dos mesmos princípios, critérios e respectivas pontuações elencadas na Tabela 1. Na Figura 1 é possível visualizar a captura de tela da página.

Figura 1 – Página da plataforma para criação da EV.

Fonte: http://educa.fc.up.pt/avaliacaoverdura/.

Procedimentos experimentais para identificação de íons metálicos em meio aquoso

Para a realização da identificação qualitativa dos cátions dos grupos I, II, III, IV e V, foi utilizada a metodologia descrita por Vogel (1981), em microescala, com adaptações no volume e concentração dos reagentes a serem precipitados. Foram realizados testes em microescala apenas com os reagentes disponíveis no laboratório de Química Analítica do curso de Licenciatura em Química do IFPR, campus Palmas. Os testes foram realizados em um tubo de ensaio, adicionando-se, primeiramente, 0,5 mL de uma solução de cada cátion em análise e, em seguida, gota a gota, uma solução de cada reagente precipitante indicado no Quadro 1. Todas as soluções utilizadas foram preparadas em concentrações de 0,1 mol L^{-1}, com exceção de: HCl; NH_4OH; NH_3; $C_4H_6O_6$ e $HClO_4$. Para estas, utilizou-se a concentração de 2 mol L^{-1}.

Quadro 1 – Cátions identificados qualitativamente com classificação em grupos de acordo com Vogel (1981) e reagentes utilizados na identificação.

Grupos	Reagentes Precipitantes	Cátions Constituintes
I	Ácido clorídrico diluído (HCl) Solução aquosa Amônia (NH_3) Hidróxido de sódio (NaOH) Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) Cromato de Potássio (K_2CrO_4) Iodeto de Potássio (KI) Carbonato de Sódio (Na_2CO_3)	Pb^{2+}
	Ácido clorídrico diluído (HCl) Solução aquosa Amônia (NH_3) Hidróxido de sódio (NaOH) Cromato de Potássio (K_2CrO_4) Iodeto de Potássio (KI) Carbonato de Sódio (Na_2CO_3)	Ag^{+}
	Solução aquosa Amônia (NH_3)	

II	Hidróxido de sódio (NaOH) Iodeto de Potássio (KI) Cloreto de Estanho II ($SnCl_2$)	Hg^{2+}
	Solução aquosa Amônia (NH_3) Hidróxido de sódio (NaOH) Iodeto de Potássio (KI)	Bi^{3+}, Cu^{2+}, Cd^{2+}
	Hidróxido de sódio (NaOH) Solução aquosa de Cloreto de Mercúrio (II) ($HgCl_2$)	Sn^{2+}
III	Hidróxido de sódio (NaOH); Solução aquosa Amônia (NH_3);	Fe^{3+}, Co^{2+}
IV	Solução aquosa Amônia (NH_3) Carbonato de amônio [$(NH_4)_2 CO_3$] Solução de oxalato de amônio ($C_2H_8N_2O_4$) Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) Solução saturada de sulfato de cálcio ($CaSO_4$) Cromato de Potássio (K_2CrO_4)	Ba^{2+}, Sr^{2+}, Ca^{2+}
V	Solução aquosa Amônia (NH_3) Hidróxido de sódio (NaOH) Carbonato de amônio [$(NH_4)_2 CO_3$] Carbonato de Sódio (Na_2CO_3)	Mg^{2+}
	Ácido Tartárico ($C_4H_6O_6$) Ácido Perclórico ($HClO_4$)	K^+

Fonte: VOGEL (1981), adaptada pelos autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de Verdura Química

Segundo Machado (2014), ao trabalhar com avaliação prévia da verdura experimental, é necessário, a *priori*, levantar todos os riscos dos reagentes utilizados nas Fichas de Dados de Segurança (FDS). Neste contexto, apresentamos no Quadro 2, os sais com os íons metálicos avaliados e os reagentes necessários para cada grupo de análise, com suas respectivas frases e classificações de riscos. Estas informações foram posteriormente empregadas para a construção das Estrelas Verdes para os testes de identificação dos metais do Grupo I, II, III, IV e V.

Quadro 2 – Frases de perigo e classificação dos riscos dos sais e reagentes necessários para identificação dos íons metálicos presentes nestes sais.

Reagente	Frases de Perigo	Classificação dos riscos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde

Nitrato de chumbo	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Cat. 1, Sangue, Sistema nervoso central, Sistema imunológico, Rim, H372	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo. Cat. 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico. Cat. 1, H410	Riscos ao Ambiente
	Oxidante, Categoria 2, H272	Riscos Físicos
Ácido Clorídrico	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
Amônia	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório, H335	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
Hidróxido de Sódio	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Corrosivo para a pele, Categoria 1A, H314	Riscos à saúde
Ácido Sulfúrico	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Corrosivo para a pele, Categoria 1A, H314	Riscos à saúde
Cromato de Potássio	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 1B, H340	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, Inalação, H350i	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório, H335	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Iodeto de Potássio	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 1, Oral, Tiroide, H372	Riscos à saúde
Carbonato de sódio	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Cloreto de Mercúrio (II)	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 2, H341	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 2, H361f	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 1, Rim, H372	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Cloreto de Bismuto (III)	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Cloreto de estanho (II)	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele. Categoria 1, H317	Riscos à saúde

	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático, Agudo. Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático, Crônico. Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Nitrato de Prata	Oxidante, Categoria 2, H272	Riscos Físicos
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo. Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico. Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Nitrato de Bismuto (III)	Sólido oxidante, Categoria 2, H272	Riscos Físicos
Sulfato de Cobre (II)	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Nitrato de Cádmio	Toxicidade aguda, Categoria 3, Oral, H301	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação,	Riscos à saúde
	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 1B, H340	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1B, H360F	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico, exposição repetida, Categoria 1, H372	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Cloreto de Ferro (III)	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
Cloreto de Cobalto	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Sensibilização respiratória, Categoria 1, H334	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 2, H341	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, Inalação, H350i	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1B, H360F	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Sulfeto de Amônio	Sólido oxidante, Categoria 3, H272	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde

	Sensibilização respiratória, Categoria 1, H334	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório, H335	Riscos à saúde
Cloreto de Bário	Toxicidade aguda, Categoria 3, Oral, H301	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Oxalato de amônio	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Dérmico, H312	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Cloreto de Estrôncio	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
Cloreto de Cálcio	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Ácido Perclórico	Líquido inflamável, Categoria 3, H226	Riscos Físicos
	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Corrosivo para a pele, Categoria 1A, H314	Riscos à saúde
Ácido Tartárico	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
Carbonato de Amônio	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
Sulfato de Cálcio	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem riscos
Cloreto de Potássio	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem riscos
Cloreto de Magnésio	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem riscos

Fonte: (FDS).

Os riscos de cada reagente indicados no Quadro 2 alertam para alguns cuidados necessários na manipulação dessas substâncias e a necessidade do uso de equipamentos de proteção individual (jaleco, luvas, máscaras e óculos de segurança).

Também se ressalta a necessidade de atenção durante a manipulação de reagentes mais tóxicos, como o chumbo (Pb^{2+}) e a prata (Ag^{+}), do grupo I. O chumbo (Pb^{2+}), por exemplo, quando em contato com o organismo, não sofre metabolização, sendo complexado por macromoléculas, diretamente absorvido, distribuído e excretado. As vias de contaminação podem ser a inalação e a ingestão. O chumbo é bem absorvido por inalação e até 16% ingerido por adultos pode ser absorvido. Quando absorvido, o chumbo é distribuído para o sangue, onde tem meia-vida de 37 dias, para os tecidos moles, em que a meia-vida é de 40 dias e para os ossos, tem meia-vida de 27 anos, constituindo este o maior depósito corporal do metal, armazenando 90 a 95% do chumbo presente no corpo (MOREIRA, F.; MOREIRA, J., 2004).

Segundo Santos et al. (2014), os efeitos de saúde mais comuns associados à exposição crônica à prata (Ag^{+}) são um cinza permanente ou coloração azul-acinzentada

da pele e outros órgãos. O grau de exposição inferior à prata também resulta no metal a ser depositado na pele e outras partes do corpo, tais como fígado, cérebro, músculos e nos rins, e pode provocar alterações nas células sanguíneas. A exposição a níveis elevados de prata no ar pode resultar em problemas respiratórios, pulmão e irritação da garganta e dores de estômago. Contato da pele com prata pode causar reações alérgicas ligeiras, incluindo erupções cutâneas, inchaço e inflamação em algumas pessoas.

Já os metais do Grupo II, como o mercúrio (Hg^{2+}), bismuto (Bi^{3+}), cobre (Cu^{2+}), estanho (Sn^{2+}) e cádmio (Cd^{2+}), também representam riscos. De acordo com Micaroni (2000), a toxicidade do mercúrio (Hg^{2+}) varia nos seus diferentes compostos. A forma orgânica é extremamente tóxica, não apenas para o ser humano, mas para toda a biota.

Os principais sintomas associados à toxicidade por exposição ao mercúrio incluem tremor, vertigem, entorpecimento, dor de cabeça, cãibra, fraqueza, depressão, distúrbios visuais, dispneia, tosse, inflamações gastrointestinais, queda de cabelo, náusea e vômitos (MICARONI, 2000).

O bismuto tem como efeitos colaterais mais graves a disfunção neurológica e a nefrotoxicidade em consequência da superdosagem. No entanto, os efeitos tóxicos provocados pelo bismuto são reversíveis ao longo de algumas semanas ou meses (RODRIGUES et al., 2009).

O estanho (Sn^{2+}) não é muito tóxico, pois é de difícil absorção. A entrada do estanho no organismo pode ocorrer através da inalação, ingestão e contato dérmico, tanto para as formas inorgânicas como orgânicas do metal. Porém, a ingestão de grandes quantidades pode produzir dores no estômago, anemia, danos no fígado e rins (FIORUCCI et al., 2012).

Os metais dos grupos III, IV e V representam riscos para a saúde, porém alguns desempenham funções importantes no metabolismo dos seres vivos. Suas propriedades demonstram-se fundamentais na manutenção da estrutura tridimensional de biomoléculas essenciais ao metabolismo celular. Entretanto, acima de uma determinada faixa de concentração, o metal passa a exercer uma ação tóxica sobre o desenvolvimento do organismo, tornando-se letal. Outros metais não apresentam função biológica relevante, mas para estes há também uma faixa de concentração em que o organismo tolera sua presença e que, quando acima desta, torna-se letal. Metais como bário e estrôncio não trazem nenhum benefício ao ser humano, apesar disso, em pequenas quantidades não fazem mal (LIMA; MERÇON, 2011).

Ao trabalhar com reações químicas, sempre é necessário voltar a atenção aos resíduos produzidos e ao seu reconhecimento, considerando que o princípio 2 da QV, em seu critério 1, prevê que os resíduos não representem perigos à saúde ou ao ambiente. Para isso pode se prever teoricamente, por meio de reações químicas, quais produtos serão gerados e os possíveis riscos físicos, à saúde e ao ambiente.

Neste contexto, o Quadro 3 apresenta os produtos/resíduos gerados na identificação dos cátions dos grupos I, II, III, IV e V, com suas respectivas frases e classificações de riscos.

Quadro 3 – Produtos/resíduos formados e respectivas frases e classificação de riscos.

Reagente	Frases de Perigo	Classificação dos riscos
$PbCl_2$	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sistema nervoso central, Rim, Sangue, Sistema imunológico, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Pb(OH)_2$	Carcinogenicidade, Categoria 2, H351	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sistema nervoso central, Sangue, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$PbSO_4$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sistema nervoso central, Sangue, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$PbCrO_4$	Carcinogenicidade, Categoria 2, H351	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sistema nervoso central, Sangue, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
PbI_2	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde

	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sistema nervoso central, Sangue, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$PbCO_3$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1A, H360Df	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico – exposição repetida, Categoria 2, Sangue, Sistema nervoso central, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
AgCl	Corrosivo para os metais, Categoria 1, H290	Riscos Físicos
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Ag_2O	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Ag_2CrO_4	Sensibilização respiratória, Categoria 1, H334	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
AgI	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Ag_2CO_3	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$HgO{\cdot}Hg(NH_2)NO_3$	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação, H330	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 1, Dérmico, H310	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sangue, Sistema nervoso central, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
HgO	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação, H330	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 1, Dérmico, H310	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Sangue, Sistema nervoso central, Sistema imunológico, Rim, H373	Riscos à saúde
HgI_2	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação, H330	Riscos à saúde

	Toxicidade aguda, Categoria 1, Dérmico, H310	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 2, Rim, H373	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Hg_2Cl_2	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 2, H341	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 2, H361f	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 1, Rim, H372	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Bi(OH)_2NO_3$	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório, H335	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao ambiente
$Bi(OH)_3$	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
BiI_3	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
$Cu(OH)_2{\cdot}CuSO_4$	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação, H330	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Cu(OH)_2$	Toxicidade aguda, Categoria 2, Inalação, H330	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
CuI	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório, H335	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Sn(OH)_2$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele. Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático, Agudo. Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente

	Perigoso ao ambiente aquático, Crônico. Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
Hg_2Cl_2	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 2, H341	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 2, H361f	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 2, Oral, H300	Riscos à saúde
	Toxicidade sistêmica de órgão-alvo específico - exposição repetida, Categoria 1, Rim, H372	Riscos à saúde
	Corrosivo para a pele, Categoria 1B, H314	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Cd(OH)_2$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$Fe(OH)_3$	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
$Co(OH)_3$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$Co(OH)NO_3$	Carcinogenicidade, Categoria 1B, Inalação, H350i	Riscos à saúde
	Mutagenicidade em células germinativas, Categoria 2, H341	Riscos à saúde
	Toxicidade à reprodução, Categoria 1B, H360F	Riscos à saúde
	Sensibilização respiratória, Categoria 1,	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$BaCO_3$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
$Ba(COO)_2$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Dérmico, H312	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
$BaSO_4$	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Sensibilização respiratória, Categoria 1, H334	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
$BaCrO_4$	Sólido oxidante, Categoria 3, H272	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Sensibilização à pele, Categoria 1, H317	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Inalação, H332	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$SrCO_3$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Irritação da pele, Categoria 2, H315	Riscos à saúde
	Lesões oculares graves, Categoria 1, H318	Riscos à saúde
$SrSO_4$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$Sr(COO)_2$	Sólido oxidante, Categoria 3, H272	Riscos Físicos
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde

	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$SrCrO_4$	Sólido oxidante, Categoria 3, H272	Riscos Físicos
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$CaSO_4$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$Ca(COO)_2$	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Dérmico, H312	Riscos à saúde
	Irritação ocular, Categoria 2, H319	Riscos à saúde
$CaCrO_4$	Sólido oxidante, Categoria 3, H272	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
	Carcinogenicidade, Categoria 1B, H350	Riscos à saúde
	Perigoso ao ambiente aquático – Agudo, Categoria 1, H400	Riscos ao Ambiente
	Perigoso ao ambiente aquático – Crônico, Categoria 1, H410	Riscos ao Ambiente
$Mg(OH)_2$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$MgCO_3$	Esta substância não é classificada como perigosa de acordo com a legislação da União Europeia.	Sem Riscos
$KHC_4H_4O_6$	Sólido oxidante, Categoria 1, H271	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde
$KClO_4$	Sólido oxidante, Categoria 1, H271	Riscos Físicos
	Toxicidade aguda, Categoria 4, Oral, H302	Riscos à saúde

Fonte: (FDS).

Como visto nos Quadros 2 e 3, a partir do conhecimento prévio dos riscos que os reagentes e possíveis produtos/resíduos podem causar ao ambiente e à saúde, é possível ter alguns cuidados e prever possibilidades para redução, tratamento e descarte dos resíduos gerados.

Segundo Souza et al. (2016), o descarte inadequado de soluções contendo os metais mostrados no Quadro 3 pode resultar em uma série de problemas ambientais relacionados, principalmente, aos organismos dependentes desses ambientes, incluindo a redução no crescimento e até a extinção da vegetação, a contaminação das águas superficiais e dos aquíferos, além da toxicidade direta para os seres humanos, os animais e os microrganismos.

Na visão de Galuszka et al. (2013), antes de iniciar qualquer prática experimental, seja esta aplicável no ensino ou na indústria, sempre é necessário: projetar ações na tentativa de reduzir a geração de resíduos, para evitar a produção de um grande volume; desenvolver procedimentos analíticos para reduzir o consumo de energia; tentar eliminar

ou substituir os reagentes altamente tóxicos por reagentes menos nocivos; dar prioridade para a segurança dos manipuladores (estudantes, técnicos, professores e até mesmo profissionais da área); dar preferência para técnicas analíticas diretas para evitar o pré-tratamento da amostra e reduzir ou omitir solventes; tentar evitar derivatização; reduzir a quantidade e número de amostras e dar preferência aos métodos multianalitos em relação aos métodos que usam um analito de cada vez.

Adotar essa iniciativa preventiva contribui para a importância de se avaliar o grau de risco dos reagentes e produtos, pois a pessoa saberá o risco a que está exposta ao manipular tais reagentes e produtos químicos. Nesse contexto, as métricas da QV podem-se tornar extremamente úteis, pois remetem a uma necessária reflexão acerca dos desafios encontrados para mudar as formas de pensar e agir em torno das questões ambientais, socioambientais e éticas, acarretando uma formação cidadã consciente da relevância dessa abordagem.

Estrelas Verdes e reações de identificação dos íons metálicos em meio aquoso e relações com a solubilidade e pH

Nos tópicos seguintes, são apresentados os reagentes empregados, as equações moleculares, iônicas e líquidas e a constante de solubilidade (K_{ps}) do precipitado formado (ppt) na investigação dos cátions dos grupos I, II, III, IV e V.

Estes tipos de reações são comumente representados por equações moleculares, também chamadas de equações balanceadas. Em uma reação molecular, os compostos iônicos e os ácidos são representados como compostos neutros usando suas fórmulas moleculares. Para além desse tipo de equação, neste trabalho, também se apresentam para fins didáticos, sempre que possível, as reações iônicas e as reações líquidas. A reação iônica é a reação química em que aparecem íons, além de átomos e moléculas, em uma equação que permite visualizar melhor a neutralização que ocorreu no processo reativo. Já a reação líquida evidencia apenas as espécies químicas que estão envolvidas na reação.

As informações dos reagentes, reações e precipitados são seguidas da EV construída para todas as análises de cada grupo em específico. Foram apresentadas apenas as equações das reações dos cátions que estabelecem o maior grau de verdura para cada grupo. As reações dos demais cátions seguem o mesmo padrão.

Cátions do Grupo I

O Grupo I é constituído pelos cátions Pb^{2+}, Ag^{+} e Hg_2^{2+} que formam sais de baixa solubilidade e coloridos em meio aquoso. Esses cátions podem ser identificados em uma solução por meio de reações de identificação, em que propriedades, como a solubilidade, o tamanho molecular (ou iônico), a polaridade (ou carga), interações químicas entre os íons, geometria, estrutura cristalina, carga nuclear efetiva, formação de complexos, acidez e basicidade (dureza e moleza) e a temperatura, são fatores que se destacam na determinação dos elementos que permitem a formação de precipitados, desprendimento de gases ou mudança de coloração (VOGEL, 1981). Conforme indicado na metodologia do trabalho, dos três cátions citados para o Grupo I, foram analisados o Pb^{2+} e o Ag^{+}.

Especificamente para o chumbo, observa-se um abaixamento da solubilidade dos sais formados após reações em função do baixo K_{ps}, com formação de precipitados de: a) $PbCl_2$, ppt branco; b) $Pb(OH)_2$, ppt branco; c) $Pb(OH)_2$, ppt branco; d) $PbSO_4$, ppt branco; e) $PbCrO_4$, ppt amarelo; f) PbI_2, ppt amarelo; g) $Pb(OH)_2$, ppt branco.

A prata é um metal branco, maleável e dúctil. Dissolve-se em ácidos mais concentrados, tais como: ácido nítrico, ou em ácido sulfúrico concentrado a quente. Em solução, forma íons monovalentes incolores. Os compostos de Ag^{2+} não são estáveis, mas desempenham uma função importante nos processos de oxirredução catalisados pela prata.

As equações moleculares, iônicas e líquidas das análises realizadas com esse íon estão reunidas no Quadro 4. Observa-se nessas reações a formação dos precipitados: a) AgCl, ppt branco; b) Ag_2O, ppt branco; c) Ag_2O, ppt marrom; d) Ag_2CrO_4, ppt vermelho; e) AgI, ppt amarelo; f) Ag_2CO_3, ppt branco amarelado. Estes precipitados ocorrem devido ao abaixamento do K_{ps} destes produtos.

Quadro 4 - Equações químicas das análises realizadas e K_{ps} dos precipitados formados para as reações com Ag^{2+}.

Reagente	Cátions	Reações	Precipitado: Kps
HCl	Ag^{+}	Molecular: $AgNO_3(aq) + HCl(aq) \rightarrow AgCl(s) + HNO_3(aq)$ Iônica: $Ag^{+}(aq) + NO_3^{-}(aq) + H^{+}(aq) + Cl^{-}(aq) \rightarrow AgCl(s) + H^{+}(aq) + NO_3^{-}(aq)$ Líquida: $Ag^{+}(aq) + Cl^{-}(aq) \rightarrow AgCl(s)$	AgCl: $1{,}77\times10^{-10}$

NH_3	Ag^+	Molecular: $2AgNO_3(aq) + 2NH_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow Ag_2O(s) + 2NH_4NO_3(aq)$ Iônica: $2Ag^+(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2NH_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow Ag_2O(s) + 2NH_4^+(aq) + 2NO_3^-(aq)$	Ag_2O: $2,6\times10^{-8}$
NaOH	Ag^+	Molecular: $2AgNO_3(aq) + 2NaOH(aq) \rightarrow Ag_2O(s) + 2NaNO_3(aq) + H_2O(l)$ Iônica: $2Ag^+(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2Na^+(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Ag_2O(s) + 2Na^+(aq) + NO_3^-(aq) + H_2O(l)$	Ag_2O: $2,6\times10^{-8}$
K_2CrO_4	Ag^+	Molecular: $2AgNO_3(aq) + K_2CrO_4(aq) \rightarrow Ag_2CrO_4(s) + 2KNO_3(aq)$ Iônica: $2Ag^+(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2K^+(aq) + CrO_4^{2-}(aq) \rightarrow Ag_2CrO_4(s) + 2K^+(aq) + NO_3^-(aq)$ Líquida: $2Ag^+(aq) + CrO_4^{2-}(aq) \rightarrow Ag_2CrO_4(s)$	Ag_2CrO_4: $1,1\times10^{-12}$
KI	Ag^+	Molecular: $AgNO_3(aq) + KI(aq) \rightarrow AgI(s) + KNO_3(aq)$ Iônica: $Ag^+(aq) + NO_3^-(aq) + K^+(aq) + I^-(aq) \rightarrow AgI(s) + K^+(aq) + NO_3^-(aq)$ Líquida: $Ag^+(aq) + I^-(aq) \rightarrow AgI(s)$	Agl: $8,3\times10^{-17}$
Na_2CO_3	Ag^+	Molecular: $2AgNO_3(aq) + Na_2CO_3(aq) \rightarrow Ag_2CO_3(s) + 2NaNO_3(aq)$ Iônica: $2Ag^+(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2Na^+(aq) + 2CO_3^{2-}(aq) \rightarrow Ag_2CO_3(s) + 2Na^+(aq) + NO_3^-(aq)$ Líquida: $2Ag^+(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightarrow Ag_2CO_3(s)$	Ag_2CO_3: $8,1\times10^{-12}$

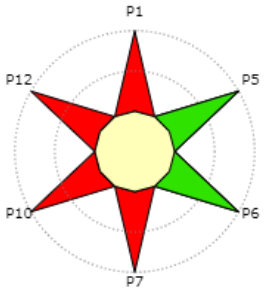
Fonte: os autores (2024).

É extremamente importante que o estudante saiba reconhecer a ocorrência de uma reação pela alteração de cor, que geralmente é o resultado de reações em que há transferência de elétrons (oxirredução) ocorrendo a formação de cátions precipitados, que fornecem a cor característica. As reações ocorrem quando duas substâncias líquidas ou em solução aquosa em contato formam um sólido, uma turvação ou até mesmo liberação de gás. As reações também podem ocorrer com o abaixamento de pH. Além disso, a partir dos fenômenos descritos, também é possível explorar as reações de dupla troca.

A Figura 2 mostra a dimensão da verdura experimental para análise clássica dos cátions do grupo I, Pb^{2+} e Ag^+.

Figura 2- EV Grupo I.

IPE 33.33%.



Fonte: Os autores (2024).

Ao avaliar a EV dos metais do grupo I (Figura 2), observa-se que o Índice de Preenchimento da EV (IPE) foi de 33,33% e que apenas P6 (Eficiência Energética) e P5 (Solventes mais seguros) apresentaram pontuação máxima 3, atingindo totalmente sua verdura química, uma vez que todas as reações são realizadas a temperatura e pressão ambientes e não há a necessidade de uso de solventes auxiliares.

Entretanto, não foram atendidos os princípios: P1(prevenção) – pois os resíduos $PbCl_2$, $Pb(OH)_2$, $PbSO_4$, $PbCrO_4$, PbI_2, $PbCO_3$, AgCl, Ag_2O, Ag_2CrO_4, AgI, Ag_2CO_3 possuem risco elevado para a saúde e ambiente; P7 (Uso de matérias primas renováveis) - Nenhum dos reagentes possui origem renovável; P10 (Planificação para degradação) – As substâncias usadas e geradas nas reações não são degradáveis nem podem ser tratadas a produtos inócuos; P12 (Química intrinsecamente segura) – As substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico. Entretanto, a análise da EV permite aferir com maior certeza a verdura química e optar em realizar as reações mais verdes. No caso para identificação do chumbo, sugerimos as reações com iodeto de potássio e carbonato de sódio, que são solventes mais seguros. Além disso, o ácido clorídrico, utilizado para precipitação da prata, pode ser substituído por cloreto de sódio, que é um reagente de fácil obtenção na natureza e não tóxico.

Cátions do Grupo II

O grupo II é constituído pelos cátions Hg^{2+}, Bi^{3+}, Cu^{2+}, Sn^{2+}, Cd^{2+}. Destes, o mercúrio é um metal branco prateado, líquido nas temperaturas normais e que não reage com os ácidos clorídrico e sulfúrico, porém reage com ácido nítrico. Os íons mercúrio apresentam comportamento completamente diverso em relação aos reagentes usados em

análise qualitativa, por isso fazem parte de grupos distintos. No grupo II, o cloreto de mercúrio II tem uma solubilidade relativamente alta.

Na reação do cátion de mercúrio com amônia, ocorre um precipitado branco de composição mista, que consiste, essencialmente, em óxido de mercúrio (II) e amidonitrato de mercúrio (II), ($HgO.Hg(NH_2)NO_3$). Já na reação com hidróxido de sódio, forma-se um precipitado vermelho pardo com composição variada. Se a adição for estequiométrica, a cor do precipitado muda para amarela, devido à formação de óxido de mercúrio (II), (HgO), porém o precipitado se torna insolúvel em excesso de hidróxido de sódio. Na reação com o iodeto de potássio, forma-se um precipitado vermelho, originando o iodeto de mercúrio (II), (HgI_2). A reação com cloreto de estanho (II) forma um precipitado branco de cloreto de mercúrio (Hg_2Cl_2). Esta reação é muito utilizada para remover o excesso de íons estanho (II), em titulações de óxido-redução.

O bismuto é um metal quebradiço, cristalino e de coloração branca avermelhada, é insolúvel em ácido clorídrico, mas se dissolve em ácidos oxidantes. Nas reações com o íon de bismuto, formam-se os precipitados de: a) $Bi(OH)_2NO_3$, ppt branco; torna-se insolúvel em excesso de reagente; b) $Bi(OH)_2NO_3$, ppt branco, insolúvel em excesso de reagente; c) $Bi(OH)_3$, ppt branco amarelado que mal chega a ser solúvel; d) BiI_3, ppt preto que se dissolve rapidamente em excesso de reagente. Estes precipitados ocorrem devido a diminuição de sua solubilidade.

Para o cobre, observa-se a formação de precipitados de menor solubilidade, o que pode ser verificado pela formação dos sólidos coloridos e pela análise do K_{ps}: a) $Cu(OH)_2.CuSO_4$, ppt branco; b) $Cu(OH)_2.CuSO_4$, ppt branco; c) $Cu(OH)_2$, ppt branco amarelado; d) CuI, ppt preto.

O estanho é um metal branco prateado, maleável e dúctil em temperaturas normais, mas em baixas temperaturas torna-se quebradiço. O metal dissolve-se lentamente em ácido clorídrico diluído e ácido sulfúrico com formação de sais de estanho (II), no qual os íons estanho (II) são fortes agentes de redução. As reações com esse cátion se caracterizam pela formação dos precipitados: a) $Sn(OH)_2$, ppt branco; b) Hg_2Cl_2, ppt branco.

O cádmio dissolve-se lentamente em ácidos diluídos, com liberação de hidrogênio molecular e forma íons divalentes e incolores. O cloreto, nitrato e sulfato de cádmio são solúveis em água. As reações desse cátion (Quadro 5) se dão com a formação dos precipitados: a) $Cd(OH)_2$, ppt branco; b) $Cd(OH)_2$, ppt branco; c) $Cd(OH)_2$, ppt branco.

Quadro 5 – Equações químicas das análises realizadas e K_{ps} dos precipitados formados para as reações com Cd^{2+}.

Reagente	Cátions	Reações	Precipitado: K_{ps}
NH_3	Cd^{2+}	Molecular: $Cd(NO_3)_2(aq) + 2NH_3(aq) + 2H_2O(l) \rightarrow Cd(OH)_2(s) + 2NH_4NO_3(aq)$ Iônica: $Cd^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2NH_3(aq) + 2H_2O(l) \rightarrow Cd(OH)_2(s) + 2NH_4^+(aq) + 2NO_3^-(aq)$	$Cd(OH)_2$: $2,5\times10^{-14}$
NaOH	Cd^{2+}	Molecular: $Cd(NO_3)_2(aq) + 2NaOH(aq) \rightarrow Cd(OH)_2(s) + 2NaNO_3(aq)$ Iônica: $Cd^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2Na^+(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Cd(OH)_2(s) + 2Na^+(aq) + 2NO_3(aq)$ Líquida: $Cd^{2+}(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Cd(OH)_2(s)$	$Cd(OH)_2$: $2,5\times10^{-14}$

Fonte: Os autores (2024).

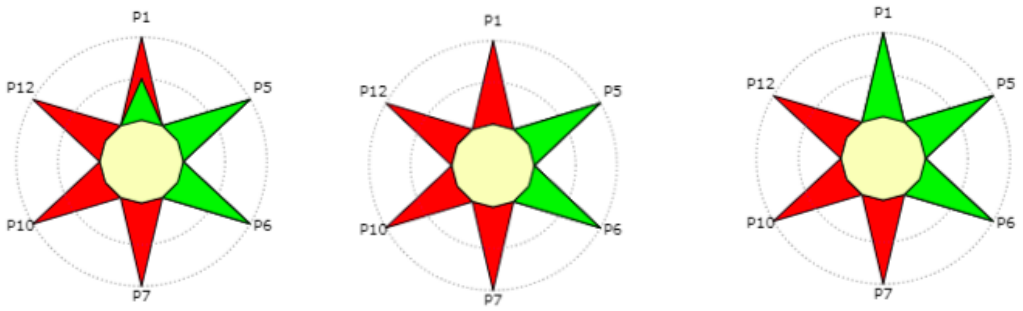
A Figura 3 mostra a dimensão da verdura experimental para análise clássica dos cátions do grupo II.

Figura 3 – EV Grupo II.

(a)
IPE 41,67%
- Reação do Bi^{3+} com Solução de Amônia
-Reação do Bi^{3+} com Hidróxido de Sódio
- Reação do Cu^{2+} com Hidróxido de Sódio
- Reação do Cu^{2+} com Iodeto de Potássio

(b)
IPE 33,33%
- Reação do Bi^{3+} com Iodeto de Potássio
- Reação do Cu^{2+} com Solução de Amônia
- Reação do Cu^{2+} com Iodeto de Potássio
- Reação do Sn^{2+} com Hidróxido de Sódio
- Reação do Sn^{2+} com Cloreto de Mercúrio

(c)
IPE 50,00%
- Reação do Cd^{2+} com Solução de Amônia
- Reação do Cd^{2+} com Hidróxido de Sódio



Fonte: Os autores (2024).

Ao analisar a EV dos metais do grupo II [Figura 3(c)], nota-se que a reação mais verde corresponde ao cátion Cd^{2+} do grupo II, com IPE de 50,00%, P1 (Prevenção), P6

(Eficiência Energética) e P5 (Solventes mais seguros) com pontuação máxima 3, atingindo totalmente sua verdura química, uma vez que todas as reações são realizadas sem formação de resíduos com riscos graves, a temperatura e pressão ambientais e não se faz necessário o uso de solventes auxiliares. Algumas reações com bismuto e as reações com cobre [Figura 3(a)] apresentaram um IPE 41,67%, pois em todas as reações há pelo menos um resíduo que envolva perigo moderado para a saúde e ambiente, atendendo parcialmente o P1. Já o IPE de outras reações com bismuto e reações com cobre II e estanho II foi de 33,33%. [Figura 3(b)], uma vez que P1 não é atendido, com destaque para os resíduos $HgO.Hg(NH_2)NO_3$, HgO, HgI_2, Hg_2Cl_2, BiI_3, $Cu(OH)_2.CuSO_4$, $Cu(OH)_2$, CuI e Hg_2Cl_2 que possuem risco elevado para a saúde e ambiente. Em todos os testes não foram atendidos: P7, pois nenhum dos reagentes possui origem renovável; P10, pois as substâncias usadas e geradas nas reações não são degradáveis nem podem ser tratadas a produtos inócuos; P12, pois as substâncias envolvidas apresentam perigo elevado de acidente químico.

Cátions do Grupo III

O grupo III é formado pelos íons Fe^{3+} e Co^{2+}. O ferro, quimicamente puro, é um metal branco prateado, porém ele é encontrado na forma comercial raramente pura, contendo, em geral, pequenas quantidades de contaminantes que exercem um papel importante na resistência de estruturas metálicas de ferro.

O ferro forma duas importantes séries de sais: a) os sais de ferro (II), derivados do óxido de ferro (III). Os íons de ferro (II) são facilmente oxidados a ferro (III), sendo, portanto, agentes redutores fortes; b) os sais de ferro (III), derivados do óxido de ferro (III), sendo mais estáveis que o ferro (II).

As reações com esse metal se processam com a formação dos precipitados: a) o produto de solubilidade do $Fe(OH)_3$ é tão reduzido que ocorre a precipitação completa, mesmo na presença de sais de amônio, formando um precipitado (ppt) gelatinoso marrom avermelhado; b) $Fe(OH)_3$, ppt marrom avermelhado.

Para o cobalto, as reações geram os precipitados: a) $Co(OH)_3$, ppt marrom avermelhado; b) $Co(OH)NO_3$, ppt marrom avermelhado (Quadro 6). A formação destes precipitados está relacionada ao abaixamento de seus K_{ps}.

Quadro 6 – Equações químicas das análises realizadas e K_{ps} dos precipitados formados para as reações com Co^{2+}.

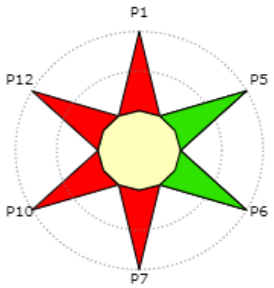
Reagente	Cátions	Reações	Precipitado: K_{ps}
NH_3	Co^{2+}	Molecular: $CoCl_2.6H_2O(aq) + 2NH_3(g) + NO_3(aq) \rightarrow Co(OH)NO_3(s) + 2NH_4Cl(aq) + 5H_2O(l)$ Iônica: $Co^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2NH_3(g) + NO_3^-(aq) \rightarrow Co(OH)NO_3(s) + 2Cl^-(aq) + 5H_2O(l) + 2NH_4^+(aq) + 2Cl^-(aq)$	$Co(OH)NO_3$: K_{ps} não encontrado (insolúvel em meio aquoso)
NaOH	Co^{2+}	Moleculares: $CoCl_2.6H_2O(aq) + 2NaOH(aq) \rightarrow Co(OH)_2(s) + 2NaCl(aq) + 6H_2O(l)$ $Co(OH)_2(s) + ¼\ O_2(g) + ½\ H_2O(l) \rightarrow Co(OH)_3$ Iônica: $Co^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2Na^+(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Co(OH)_2(s) + 2Na^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$	$Co(OH)_3$: $1,6\times10^{-44}$

Fonte: Os autores (2024).

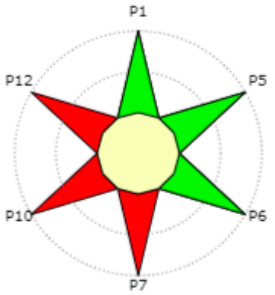
A Figura 4 mostra a dimensão da verdura experimental para análise clássica dos cátions do grupo III, Fe^{2+} e Co^{2+}.

Figura 4 – EV Grupo III.

(a)
IPE 33,33%
- Reação Fe^{3+} com hidróxido de sódio
- Reação Fe^{3+} com Solução de Amônia
- Reação Co^{2+} com Solução de Amônia



(b)
IPE 50,00%
- Reação Co^{2+}
com Hidróxido de Sódio



Fonte: Os autores (2024).

Nota-se na EV dos metais do grupo III [Figura 4(a)], Ferro II com soluções de hidróxido de sódio e solução de amônia um IPE de 33,33% [Figura 4(a)], que houve apenas o atendimento dos princípios P5 (Solventes mais seguros) e P6 (Eficiência energética), no qual, ambos obtendo pontuação máxima 3, atingindo totalmente sua verdura química uma vez que todas as reações são realizadas a temperatura e pressão ambientais e não se faz uso de solventes/substâncias auxiliares que apresentem risco para

a saúde e ambiente. Contudo, a reação do cloreto de cobalto com hidróxido de sódio [Figura 4(b)] atingiu totalmente o P1, com o resíduo [$Co(OH)_3$] não possuindo riscos elevados para a saúde e ambiente, o que atribui um índice de verdura maior (50,00%).

Nestes testes, pode-se inferir que a reação de cloreto de cobalto com hidróxido de sódio é a mais verde, abrangendo P1, P5 e P6 em sua totalidade, sendo as reações mais adequadas a serem realizadas. Apesar disso, não foram atendidos os princípios 7, 10 e 12, pelas mesmas razões previstas nos metais dos grupos I e II discutidos anteriormente.

Cátions do grupo IV

Os metais do grupo IV são representados pelos cátions Ba^{2+}; Sr^{2+} e Ca^{2+}. O bário é um metal branco prateado, maleável e dúctil, estável em ar seco. Reage com a água à temperatura ambiente, formando hidróxido de bário e hidrogênio. O bário é divalente em seus sais, formando o cátion Ba^{2+}.

As reações com bário formam os precipitados: a) $BaCO_3$, ppt branco; b) $Ba(COO)_2$, ppt branco; c) $BaSO_4$, ppt branco; d) $BaSO_4$, ppt branco; e) $BaCrO_4$, ppt amarelo, em função do abaixamento de seus Kps, durante os processos reativos.

O cálcio decompõe a água com formação de hidróxido de cálcio e hidrogênio, gerando o cátion Ca^{2+}. Seus sais são normalmente brancos e formam soluções incolores, a menos que os ânions que os formam sejam coloridos. O cloreto de cálcio sólido é higroscópico e é frequentemente usado como agente secante.

Na análise do cálcio, as reações ocorrem por meio da formação dos precipitados: a) $CaSO_4$, ppt branco; b) $Ca(COO)_2$, ppt branco; c) $CaCrO_4$, ppt amarelo.

Para o estrôncio, as reações formam precipitados de baixo K_{ps}: a) $SrCO_3$, ppt branco; b) $SrSO_4$, ppt branco; c) $SrSO_4$, ppt branco; d) $Sr(COO)_2$, ppt branco; e) $SrCrO_4$, ppt amarelo. As reações deste metal se encontram reunidas no Quadro 7.

Quadro 7– Equações químicas das análises realizadas e K_{ps} dos precipitados formados para as reações com Sr^{2+}.

Reagente	Cátion	Reações	Precipitado: K_{ps}
$(NH_4)_2CO_3$	Sr^{2+}	Molecular: $SrCl_2.6H_2O(aq) + (NH_4)_2CO_3(aq) \rightarrow SrCO_3(s) + 2NH_4Cl(aq) + 6H_2O(l)$ Iônica: $Sr^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2NH_4^+(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightarrow SrCO_3(s) + 2NH_4^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$ Líquida: $Sr^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightarrow SrCO_3(s)$	$SrCO_3$: $5{,}60\times10^{-10}$

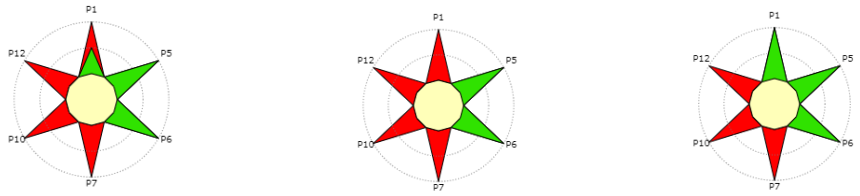
$C_2H_8N_2O_4$	Sr^{2+}	Molecular: $SrCl_2.6H_2O(aq) + C_2H_8N_2O_4(aq) \rightarrow Sr(COO)_2(s) + 2NH_4Cl(aq)$ Iônica: $Sr^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + NH_4^+(aq) + (COO)_2^{2-}(aq) \rightarrow Sr(COO)_2(s) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + NH_4^+(aq)$ Líquida: $Sr^{2+}(aq) + (COO)_2^{2-}(aq) \rightarrow Sr(COO)_2(s)$	$Sr(COO)_2$: K_{ps} não encontrado (insolúvel em meio aquoso)
H_2SO_4	Sr^{2+}	Molecular: $SrCl_2.6H_2O(aq) + H_2SO_4(aq) \rightarrow SrSO_4(s) + 2HCl(aq) + 6H_2O(l)$ Iônica: $Sr^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(aq) + 2H^+(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrSO_4(s) + 2H^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$ Líquida: $Sr^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrSO_4(s)$	$SrSO_4$: $3,44\times10^{-7}$
$CaSO_4$	Sr^{2+}	Molecular: $SrCl_2.6H_2O(aq) + CaSO_4(aq) \rightarrow SrSO_4(s) + CaCl_2(aq) + 6H_2O(l)$ Iônica: $Sr^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(aq) + Ca^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrSO_4(s) + Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$ Líquida: $Sr^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrSO_4(s)$	$SrSO_4$: $3,44\times10^{-7}$
K_2CrO_4	Sr^{2+}	Molecular: $SrCl_2.6H_2O(aq) + K_2CrO_4(aq) \rightarrow SrCrO_4(s) + 2KCl(aq) + 6H_2O(l)$ Iônica: $Sr^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2K^+(aq) + CrO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrCrO_4(s) + 2K^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$ Líquida: $Sr^{2+}(aq) + CrO_4^{2-}(aq) \rightarrow SrCrO_4(s)$	$SrCrO_4$: 4×10^{-5}

Fonte: Os autores (2024).

A Figura 5 mostra a dimensão da verdura experimental para análise clássica dos cátions do grupo IV, Ba^{2+}; Sr^{2+} e Ca^{2+}.

Figura 5 - EV dos metais do grupo IV.

(a)	(a)	(c)
IPE 41,67% - Reação do Ba^{2+} com Carbonato de Amônio - Reação do Ba^{2+} com Oxalato de Amônio - Reação do Sr^{2+} com Oxalato de Amônio - Reação do Sr^{2+} com Cromato de Potássio	IPE 33,33% - Reação do Ba^{2+} com Ácido Sulfúrico - Reação do Ba^{2+} com Solução Saturada de Sulfato de Cálcio - Reação do Ba^{2+} com Cromato de Potássio - Reação do Sr^{2+} com Carbonato de Amônio - Reação do Ca^{2+} com Oxalato de Amônio - Reação do Ca^{2+} Cromato de Potássio	IPE 50,00% - Reação do Sr^{2+} com Ácido Sulfúrico - Reação do Sr^{2+} com solução Saturada de Sulfato de Cálcio - Reação do Ca^{2+} com Ácido Sulfúrico



Fonte: Os autores (2024).

Ao analisar a EV dos metais do grupo IV (Figura 5) percebe-se que as reações mais indicadas a serem realizadas são as das Figuras 5(a) (IPE 41,67%) e 8(c) (IPE 50,00%), as quais atingem, respectivamente, parcial e totalmente P1 e totalmente P5 e P6.

Nas reações indicadas na Figura 5(b), não foram atendidos: P1, devido à formação dos resíduos $CaCrO_4$, $SrCrO_4$, $Sr(COO)_2$, $BaCO_3$, $Ba(COO)_2$, $BaCrO_4$, que possuem risco elevado para a saúde e ambiente; P7, pois nenhum dos reagentes possui origem renovável; P10, devido às substâncias usadas e geradas nas reações não serem degradáveis nem poderem ser transformadas em produtos inócuos; P12, em consequência das substâncias envolvidas apresentarem perigo elevado de acidente químico.

Cátions do Grupo V

Nos cátions do grupo V (Mg^{2+} e K^{+}), o magnésio é lentamente decomposto pela água à temperatura ambiente e dissolve-se facilmente em ácidos, formando os cátions divalentes Mg^{2+}.

As reações com esse cátion (Quadro 8) geram os precipitados: a) $Mg(OH)_2$, ppt branco gelatinoso; b) $Mg(OH)_2$, ppt branco; c) $4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O$, ppt branco; d) $4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O$, ppt branco.

O potássio é um metal branco prateado e mole, permanece inalterado no ar seco, mas é rapidamente oxidado no ar úmido. Comumente, o potássio é guardado em nafta solvente. Os sais de potássio contêm os cátions K^{+}, são geralmente solúveis e geram soluções incolores, a menos que o ânion que os forma seja colorido. Para esse cátion, foram formados: a) $KHC_4H_4O_6$, ppt branco; b) $KClO_4$, ppt branco.

Quadro 8 – Equações químicas das análises realizadas e K_{ps} dos precipitados formados para as reações com Mg^{2+}.

Reagente	Cátions	Reações	Precipitado: Kps
NH_3	Mg^{2+}	Molecular: $MgCl_2.6H_2O(aq) + 2NH_3(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + 2NH_4Cl(aq) + 4H_2O(l)$ Iônica: $Mg^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2NH_3(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + 2NH_4^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 4H_2O(l)$	$Mg(OH)_2$: $5{,}61\times10^{-12}$
NaOH	Mg^{2+}	Molecular: $MgCl_2.6H_2O(aq) + 2NaOH(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + 6H_2O(l) + 2NaCl(aq)$ Iônica: $Mg^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l) + 2Na^+(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s) + 2Na^+(aq) + 2Cl^-(aq) + 6H_2O(l)$ Líquida: $Mg^{2+}(aq) + 2OH^-(aq) \rightarrow Mg(OH)_2(s)$	$Mg(OH)_2$: $5{,}61\times10^{-12}$
$(NH_4)_2CO_3$	Mg^{2+}	Molecular: $5MgCl_2.6H_2O(aq) + 6(NH_4)_2CO_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow 4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O(s) + 2NH_4HCO_3(aq) + 10NH_4Cl(aq)$ Iônica: $5Mg^{2+}(aq) + 10Cl^-(aq) + 30H_2O(l) + 12NH_4^+(aq) + 6CO_3^-(aq) + H_2O(l) \rightarrow 4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O(s) + 2NH_4(aq) + 2HCO_3(aq) + 10NH_4^+(aq) + 10Cl(aq)$	$MgCO_3$: $6{,}82\times10^{-6}$
Na_2CO_3	Mg^{2+}	Molecular: $5MgCl_2.6H_2O(aq) + 6Na_2CO_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow 4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O(s) + 2NaHCO_3(aq) + 10NaCl(aq)$ Iônica: $5Mg^{2+}(aq) + 10Cl^-(aq) + 7H_2O(l) + 12Na^+(aq) + 6CO_3^{2-}(aq) \rightarrow 4MgCO_3.Mg(OH)_2.5H_2O(s) + 12Na^+(aq) + 2HCO_3^-(aq) + 10Cl^-(aq)$	$MgCO_3$: $6{,}82\times10^{-6}$

Fonte: Os autores (2024)

A Figura 6 mostra a dimensão da verdura experimental para análise clássica dos cátions do grupo V, Mg^{2+} e K^+.

Figura 6 - EV metais do grupo V.

(a)
IPE 50,00%
- Reação do Mg^{2+} com Solução de Amônia
- Reação do Mg^{2+} com Hidróxido de Sódio
- Reação do Mg^{2+} com Carbonato de Amônio
- Reação do Mg^{2+} Carbonato de Sódio

(b)
IPE 41,67%
- Reação do K^+ com Ácido Tartárico
- Reação do K^+ com Ácido Perclórico

Fonte: os autores (2024).

Ao analisar a EV dos metais do grupo V, nota-se que as reações com o magnésio são mais verdes [Figura 6(a)], com IPE de 50,00%. Os princípios P1 (Prevenção), P5 (Solventes mais seguros) e P6 (Eficiência energética) foram totalmente cumpridos. Apesar disso, não foram atendidos: P7 (Uso de matérias-primas renováveis); P10 (Planificação para degradação) e o P12 (Química intrinsecamente segura).

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a verdura química de reações clássicas de identificação de cátions dos grupos I ao V por meio da métrica EV. Os Índices de Preenchimento obtidos (33,33% a 50,00%) evidenciam que, embora os procedimentos em microescala atendam plenamente aos princípios de eficiência energética (P6) e segurança de solventes (P5), a toxicidade inerente aos elementos potencialmente tóxicos e a origem não renovável dos reagentes limitam significativamente a verdura desses procedimentos analíticos.

A aplicação da EV no contexto educacional mostrou-se eficaz para identificar as reações mais sustentáveis dentro de cada grupo analítico e para promover reflexão crítica sobre práticas laboratoriais. No âmbito da formação de professores de Química, essa abordagem resgata o valor pedagógico da Química Analítica Qualitativa clássica ao integrá-la com os desafios contemporâneos da sustentabilidade, preparando profissionais conscientes de sua responsabilidade socioambiental.

De forma geral, destacamos a importância desse trabalho em relação à compreensão da ocorrência das reações químicas empregadas para o reconhecimento de cátions em meio aquoso nas disciplinas de Química Analítica Qualitativa e também para a formação do Químico. Além disso, o planejamento de atividades práticas com perspectivas mais verdes, permitem ao estudante o conhecimento prévio dos riscos dos reagentes e resíduos e a conscientização do uso de EPIs.

Como desdobramentos futuros, sugere-se o desenvolvimento de protocolos para tratamento e recuperação dos resíduos metálicos gerados, bem como a ampliação desta

análise para outros grupos de cátions e ânions, consolidando a QV como eixo transversal no ensino de Química Analítica.

REFERÊNCIAS

ABREU, D. G.; IAMAMOTO, Y. Relato de uma Experiência Pedagógica no Ensino de Química: Formação Profissional com Responsabilidade Ambiental. **Química Nova.** v. 26, n. 4, p. 582-584, 2003.

ALVIM, T. R.; ANDRADE, J. C.; A importância da Química Analítica Qualitativa nos cursos de Químic a das instituições de ensino superior brasileiras. **Química Nova.** v. 29, n. 1, p. 168-172, 2006.

AMARAL, S. T.; MACHADO, M. C. R. P.; CAMARA, M. R.; SANTOS, T. BERLEZE, A. L.; FALCÃO, H. L.; MARTINELLI, M.; GONÇALVES, R. S.; OLIVEIRA, E. R.; BRASIL, J. L.; ARAÚJO, M. A.; BORGES, A. C. A. Relato de uma Experiência: Recuperação e Cadastramento de Resíduos dos Laboratórios de Graduação do Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Química Nova.** v. 24, n. 3, p. 419-423, 2001.

ARMENTA, S.; GARRIGUES, S.; DE LA GUARDIA, M. Green Analytical Chemistry. **Trends in Analytical Chemistry.** v.27, n.6, p. 497- 511, 2008.

CALEFI, R. M. **Ensino de Química Analítica Qualitativa na Graduação: Sua Importância e Metodologias Adotadas.** Dissertação (Mestrado em Química Analítica) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DUARTE, R.; RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. Avaliação Da Verdura De Atividades Laboratoriais De Síntese Química No Ensino Superior em Portugal. Jul/Set, 2015.

FIORUCCI, A. R.; FILHO, E. B.; OLIVEIRA, N. Os Alótropos do Estanho: Ocorrências do Estanho α e as Novas Soldas sem Chumbo Usadas em Eletrônicos. **Química Nova na Escola.** v.34, n.3, p. 124-130, 2012.

FREISER, H. Why teach qualitative analysis. **Chemical Education.** v. 34, n. 8, p. 387, 1957.

KUROWSKA-SUSDORF, A.; ZWIERŻDŻYŃSKI, M.; BEVANDA, A. M.; TALIĆ, S.; IVANKOVIĆ, A.; PŁOTKA-WASYLKA, J. Green Analytical Chemistry: Social dimension and teaching. Trends in Analytical Chemistry 2018, 111, 185.

GALUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z.; NAMIESNIK, J. The 12 principles of green analytical chemistry and the significance mnemonic of green analytical practices. **Trends in Analytical Chemistry.** v.50, p.78-84, 2013.

GAMA, M. R., MELCHERT, W. R., PAIXÃO, T. R. L. C.; ROCHA, F. R. P. An overview of the Brazilian contributions to Green Analytical Chemistry. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 91, p. e20180294, 2019. https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180294

LIMA, V. F.; MERÇON, F. Metais Pesados no Ensino de Química. **Química Nova na Escola.** v. 33, n. 4, p. 33-38, 2011.

MACHADO, A.A.S.C. **Introdução às Métricas da Química Verde:** Uma Visão Sistêmica**.** 1 ed. Florianópolis: UFSC, 2014.

MAGRIN, C. P.; LIMA, F. O. Estrela Verde: inserção da Química Verde no Ensino de Química Analítica. **Exatas Online**. v. 10, n. 2, p. 162-175, 2019.

MICARONI, R. C. C. M.; BUENO, M. I. M. S.; JARDIM, W. F. Compostos de mercúrio: Revisão de Métodos de Determinação, Tratamento e Descarte. **Química Nova.** v. 23, n.4, p. 478-495, 2000.

MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. **Ciência e Saúde Coletiva,** v. 1, p. 167-181, 2004.

NOGUEIRA, A. R. A. **Gerenciamento de resíduos dos laboratórios da EMBRAPA Pecuária Sudoeste.** São Paulo, 2003.

RIBEIRO, M. G. T. C.; MACHADO, A. A. S. C. **Pedagogia da Química Verde – Educação para a Sustentabilidade.** 2008. Disponível em: http://pedagogiadaquimicaverde.fc.up.pt/. Acesso em 5 jul. 2022.

RODRIGUES, M. A.; RUGGIERO, R.; GUERRA, W. Compostos Inorgânicos como Fármacos. **Boletim da Sociedade Portuguesa de Química.** v. 115, p. 25-30, 2009.

SANTOS, C. E. M.; COLASSO, C.; MONERÓ, T. O. Aspectos Toxicológicos da Exposição à Prata. **RevInter Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade.** v. 7, n. 1, p. 05-23, fev. 2014.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J. **Fundamentos de Química analítica.** [Tradução Marco Grassi; revisão técnica Celio Pasquini]. – São Paulo: Cengage Learning, 2006.

SOUZA, V.; KONRAD, O.; GONÇALVES, A. C. J. Contaminação por Chumbo, Riscos, Limites Legais e Alternativas de Remediação. **Veredas do Direito, Belo Horizonte.** v. 13, n. 25, p. 249-276, 2016.

STRONG III, F. C.; J. The Qualitative Analysis Course Should Teach Analysis. **Chemical Education.** v. 34, p. 400-411, 1957.

TIEZZI, E. **Tempos históricos, tempos biológicos – a terra ou a morte:** os problemas da nova ecologia. São Paulo: Nobel, 1988.

VOGEL, A. I. **Química Analítica Qualitativa.** 5. Ed – São Paulo; 1981.

VOGEL, A. I. **Análise Química Quantitativa.** [tradução Júlio Carlos Afonso, Paula Fernandes de Aguiar, Ricardo Bicca de Alencastro], Rio de Janeiro: LTC, 2017.