

5

Estudo de caso: Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio

Apresenta-se o estudo de caso do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio, focalizando-se os resultados da pesquisa de campo realizada junto a pesquisadores desse Departamento, sob a orientação direta do Professor José Marcus de Oliveira Godoy.

Inicialmente, validou-se no âmbito do Laboratório de Química Geral a adequação do uso de ferramentas de avaliação usadas no campo da Química Analítica Verde, descritas no capítulo 4. Essa validação foi feita junto a pesquisadores do Departamento envolvidos e com interesse legítimo nos resultados da presente pesquisa.

O desenvolvimento do estudo de caso compreendeu sete etapas, a saber: (i) definição das questões do estudo de caso; (ii) seleção do tipo de estudo; (iii) delimitação e caracterização da unidade de análise e seu contexto organizacional; (iv) elaboração da ferramenta para a pesquisa de campo (roteiro para as entrevistas e formulários para o diagnóstico); (v) coleta, formatação e análise dos dados; (vi) descrição dos resultados, com proposições de modificações de práticas correntes ou desenvolvimento/adoção de novas; e (vii) conclusões do estudo de caso.

5.1.

Questões e proposições do caso

A questão principal desse estudo de caso é avaliar o potencial do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio de adotar e desenvolver práticas analíticas em conformidade com os princípios da ‘Química Analítica Verde’ e critérios estabelecidos pelo *Green Chemistry Institute* e complementares. Os resultados desse estudo deverão ser endereçados ao Departamento de Química e à Coordenação da ‘Agenda Ambiental PUC-Rio’, conforme abordagem conceitual apresentada no capítulo 4.

Pretende-se, com os resultados desse estudo de caso responder três das seis questões específicas da pesquisa, a saber:

- quais os ‘perfis verdes’ das práticas ministradas no Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio, segundo sistemática que integra três ferramentas adotadas internacionalmente (pictograma *NEMI* e pictogramas complementares ao *NEMI*)?;
- quais são as práticas hoje ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio que poderão ser modificadas ou substituídas para atender aos princípios da ‘Química Verde’ aplicáveis, aos critérios definidos pelo *Green Chemistry Institute* e critérios complementares?;
- que ações de ‘Química Analítica Verde’ poderão ser inseridas na Agenda Ambiental PUC-Rio, na perspectiva de tornar o *campus* da Universidade mais sustentável e contribuir para o avanço da ‘Química Analítica Verde’ no Brasil?.

5.2.

Tipo de caso: por que estudo de caso único holístico?

Apresentam-se na Figura 5.1 os quatro tipos de estudos de casos, conforme a classificação apresentada por Yin (2005). Destacam-se os projetos de caso único, com indicação da unidade de análise do presente estudo de caso e seu contexto organizacional.

Em relação aos estudos de casos, Yin (2005) afirma que eles representam a estratégia preferida de pesquisa, em situações que as questões são do tipo ‘como’ e ‘porque’ e quando o pesquisador tem pouco controle sobre os fatos ou ainda quando o foco se encontra em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real (Yin, 2005).

O autor sugere seis fontes de evidências no sentido de se obter um bom estudo de caso. São elas: (i) documentação; (ii) registro em arquivos; (iii) entrevistas; (iv) observações diretas; (v) observações participantes; e (vi) artefatos físicos.

Neste estudo de caso, buscou-se utilizar o maior número possível dessas fontes de evidências, pois como recomenda Yin: “quanto mais fontes forem utilizadas, melhor para a qualidade do estudo de caso” (Yin, 2005). Atenção

especial foi dada durante as entrevistas junto aos pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio. Segundo Lima (2004), a entrevista, “...termina desenvolvendo uma espécie de comprometimento do entrevistado com a pesquisa, aumentando a credibilidade do material coletado” (Lima, 2004, p. 12).

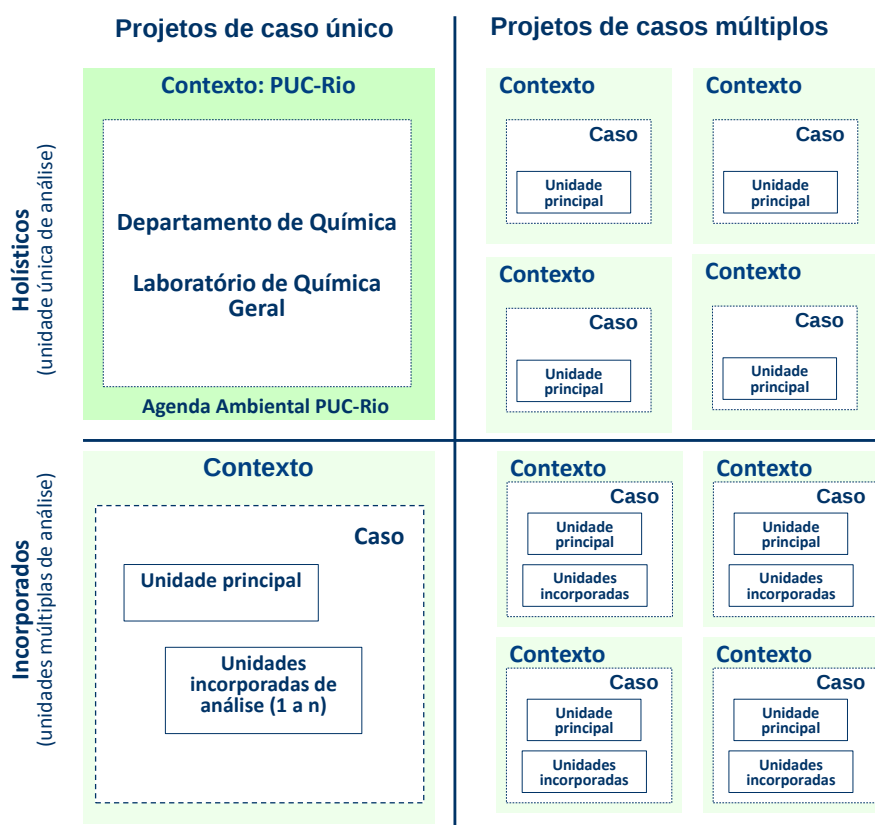


Figura 5.1 – Seleção do tipo do estudo de caso

Fonte: Adaptado de Yin, 2005, p. 61.

O tipo de caso selecionado foi o estudo de caso simples holístico, considerando-se:

- um único contexto organizacional - a PUC-Rio;
- uma unidade de análise – o Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio;
- a contribuição do Departamento de Química para a Agenda Ambiental da PUC-Rio, na perspectiva do desenvolvimento de novas práticas ‘verdes’ e da substituição das hoje adotados com perfil menos ‘verde’.

5.3. Unidade de análise e seu contexto

Apresentam-se de forma resumida o perfil institucional do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio e seu contexto organizacional – a Universidade. Dentre as unidades do Departamento de Química, esse Laboratório foi o escolhido como unidade de análise do presente estudo de caso, devido aos seguintes fatos:

- os métodos analíticos empregados pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química podem ser caracterizados com ‘perfis verdes’ favoráveis. Uma primeira análise usando o pictograma *NEMI* indicou que a maioria dos métodos analíticos não atendem a três ou quatro critérios *NEMI*;
- por outro lado, as práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral aos alunos de graduação poderão, potencialmente, ser melhoradas ou substituídas, conforme os resultados da análise dos respectivos ‘perfis verdes’ dessas práticas;
- adicionalmente, as práticas são ministradas para 682 alunos por semestre, sendo formadas em média 16 turmas. Esses dados indicam a extensão do problema e o potencial de melhoria.

Na sequência, introduz-se a Agenda Ambiental da PUC-Rio, iniciativa coordenada pelo Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente (NIMA) da Universidade e que congrega os esforços de um grupo multidisciplinar de professores e alunos na perspectiva de um campus sustentável ou *campus* verde (nos EUA e Canadá, a expressão ‘*green campus*’ vem sendo amplamente usada).

5.3.1. Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio

A Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro é uma instituição de direito privado sem fins lucrativos que busca a excelência na pesquisa, no ensino e na extensão para a formação de profissionais competentes. A PUC-Rio é fortemente voltada para a produção e transmissão do conhecimento norteado pelo

respeito ao ser humano e pela ética cristã. Inserido neste contexto organizacional, o Departamento de Química da PUC-Rio (QUI) é formado por laboratórios de ensino e pesquisa que atendem a comunidade universitária de graduação e pós-graduação, além de desenvolver projetos de pesquisa importantes para a comunidade tecnológica. O Laboratório de Química Geral (Lab. QG) faz parte da infraestrutura laboratorial do Departamento de Química da PUC-Rio como um laboratório de ensino e conta com um capacitado corpo docente de professores pesquisadores e um corpo discente formado por alunos de graduação. O principal objetivo do Lab. QG é consolidar a aprendizagem através da aplicação dos conceitos teóricos do conteúdo da disciplina de Química Geral.

As práticas (experimentos químicos) ministradas pelo Laboratório de Química Geral constam da ‘Apostila Lab. QG’, que, além dos roteiros para os experimentos, apresenta ainda o ‘Guia do Aluno’. Esse Guia contém instruções sobre normas internas básicas de segurança para utilização dos recursos do Laboratório. A elaboração da ‘Apostila Lab. QG’ é resultado de um esforço conjunto da Coordenação da Disciplina de Química Geral, dos professores que ministram as práticas e dos membros do Comitê de Qualidade Segurança Meio ambiente e Saúde do Departamento de Química da PUC-Rio.

Atualmente, um total de 12 práticas com caráter didático-pedagógico são ministradas sob a orientação de professores do Lab. QG aos alunos de graduação, que se organizam em grupos nas aulas práticas de Química Geral. As práticas objeto deste estudo de caso são:

- ‘Medidas, algarismos significativos e erros’;
- ‘Estequiometria – reação envolvendo gás’;
- ‘Gases e o princípio de Avogadro’;
- ‘Equilíbrio químico e princípio de Le Chatelier’;
- ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’;
- ‘Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre’;
- ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’;
- ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’;
- ‘Termoquímica: reações com trocas de calor e Lei de Hess’;
- ‘Cinética química: estudo da velocidade de reação – efeito da concentração’;

- ‘Eletroquímica: reações de oxirredução’;
- ‘Eletroquímica: células galvânicas’.

Apresentam-se no Quadro 5.1, a seguir, os objetivos e uma descrição sucinta de cada prática, com base nas descrições detalhadas que compõem a Apostila LAB-QG - Disciplina QUI 1709 – Química Geral (PUC-Rio, 2012).

Quadro 5.1 - Objetivos e descrição das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio

Prática	Objetivos	Descrição
Medidas, Algarismos significativos e erros	Diferenciar exatidão e precisão, expressar resultados de medição com o número correto de algarismos significativos; calcular média e desvio padrão de uma série de medidas e conhecer os erros inerentes aos instrumentos (erro absoluto e erro relativo).	Determinação do volume exato de um instrumento volumétrico em duas etapas (i) cálculo da incerteza de medição de um instrumento em diferentes volumes; (ii) comparação da exatidão e da precisão de diferentes instrumentos de medição.
Estequiometria – reação envolvendo gás	Comprovação experimental da estequiometria em reações envolvendo gás.	Comprovação da estequiometria pela determinação da quantidade de gás hidrogênio, através da medição de seu volume, produzido quando uma amostra de magnésio metálico reage com ácido clorídrico.
Gases e o princípio de Avogadro	Comprovar experimentalmente a hipótese de Avogadro, conhecida como “Princípio de Avogadro”.	Comprovação experimental do “Princípio de Avogadro” em cinco etapas (i) determinação da massa do nitrogênio em um sistema fechado (saco plástico); (ii) determinação da massa de dióxido de carbono no sistema; (iii) determinação do volume do saco plástico; (iv) determinação do volume e da massa de ar deslocado do sistema; (v) cálculos.
Equilíbrio químico e princípio de Le Chatelier	Comprovar experimentalmente o “Princípio de Le Chatelier”	O “Princípio de Le Chatelier” é comprovado em experimentos através de reações que permitem observar: (i) efeito da temperatura no equilíbrio químico; (ii) efeito do pH no equilíbrio dicromato de potássio / cromato de potássio; (iii) efeito do pH no equilíbrio ácido-base de um indicador de neutralização; (iv) efeito do íon comum.
Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base	Estudar o conceito de pH em soluções aquosas e verificar o comportamento de diferentes corantes orgânicos, conhecidos como “indicadores ácido-base”.	Determinação da concentração de H^+ em uma amostra de vinagre, em quantidade de matéria por volume de solução (mol L ⁻¹), por comparação com padrões de pH em quatro etapas (i) preparo de padrões de cores em meio ácido; (ii) preparo de padrões de cores em meio básico; (iii) determinação da concentração de H^+ a partir dos padrões; (iv) estimativa da concentração de H^+ no ácido acético.

Quadro 5.1 - Objetivos e descrição das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio (cont.)

Prática	Objetivos	Descrição
Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre	Estudar os princípios da análise volumétrica, com ênfase na volumetria de neutralização.	Determinação da concentração do ácido acético no vinagre em procedimento experimental com três etapas (i) preparo da amostra; (ii) preparo da solução padrão; (iii) titulação.
Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis	Identificar experimentalmente as substâncias pouco solúveis, as substâncias solúveis, os íons espectadores e as reações envolvidas.	Identificação de dez substâncias, feita no final do experimento, através da comparação com dados de uma tabela de “solubilidade das espécies em água à temperatura de 25°C”.
Titulação de neutralização com indicador condutométrico	Realizar titulação de neutralização com formação de um sal pouco solúvel como produto.	A titulação de neutralização é realizada em seis etapas. O ponto final da titulação, detectado com indicador ácido- base é comparado com aquele determinado pela medida da condução de corrente elétrica da solução, que é feita pelos íons em solução.
Termoquímica: reações com trocas de calor e Lei de Hess	Aplicar experimentalmente a Lei de Hess, a fim de quantificar o calor envolvido em uma transformação química.	Comprovação da Lei de Hess através da comparação dos valores medidos com valores tabelados. O experimento é realizado em três etapas (i) determinação do calor de dissolução do hidróxido de sódio sólido em água; (ii) determinação do calor de neutralização do hidróxido de sódio em solução aquosa com o ácido clorídrico em solução; (iii) determinação do calor de dissolução do hidróxido de sódio sólido e reação com ácido clorídrico em solução aquosa.
Cinética química: estudo da velocidade de reação – efeito da concentração	Estudar os efeitos das variações de concentração na velocidade da reação.	A investigação do efeito da variação da concentração de um dos reagentes sobre o tempo de reação é feita através de diferentes diluições de uma determinada solução.
Eletroquímica: reações de oxirredução	Identificar a ordem de reatividade de alguns metais e ametais e, com isso, o poder redutor ou oxidante dessas espécies.	Determinação através de reações de oxirredução das forças relativas de metais como, cobre, chumbo e zinco e seus respectivos cátions em solução de metais como agentes redutores e de substâncias simples constituídas dos halogênios cloro, bromo e iodo e seus ânions (cloreto, brometo e iodeto) em solução. O experimento é realizado em duas etapas (i) reatividade dos metais; (ii) reatividade dos ametais.

Quadro 5.1 - Objetivos e descrição das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio (cont.)

Prática	Objetivos	Descrição
Eletroquímica: células galvânicas	Verificar a espontaneidade de reações de oxirredução, medir a diferença de potencial gerada pela reação e reconhecer os meios pelos quais circulam os elétrons e os íons.	Verificação das reações de oxirredução através da montagem de uma célula galvânica (pilha).

Fonte: Elaboração própria, com base na Apostila LAB-QG - Disciplina QUI 1709 – Química Geral (PUC-Rio, Departamento de Química, 2012).

5.3.2. Agenda Ambiental PUC-Rio

A Agenda Ambiental PUC-Rio, lançada em 2009, reúne a visão de sustentabilidade de um grupo multidisciplinar de professores e alunos e vem sendo coordenada pelo Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente (NIMA) da Universidade. Compreende um conjunto de práticas que permitam e estimulem a sustentabilidade e a qualidade de vida socioambiental no campus universitário, tendo como base os princípios humanitários, científicos e éticos (PUC-Rio/Nima, 2009).

A Agenda está estruturada em torno de sete eixos temáticos: (i) biodiversidade; (ii) água; (iii) energia; (v) materiais; (vi) resíduos; (vii) educação ambiental.

Cada eixo divide-se em três partes. Uma introdução que situa o posicionamento ético ambiental assumido; uma parte denominada diretriz, que define as linhas norteadoras que devem ser seguidas dentro da temática de cada eixo; e as metas, que visam realizar as diretrizes estabelecidas. As metas, por sua vez, se dividem em categorias de:

- curto prazo;
- médio prazo;
- longo prazo.

Essas diretrizes devem contribuir umas com as outras para a construção de um escala de valores que contemple tanto as categorias de ideal de um consumo

mínimo, quanto o esforço necessário de reaproveitamento máximo de tudo o que faz parte dos recursos renováveis e não renováveis presentes no *campus* da universidade (PUC-Rio/Nima, 2009).

A sustentabilidade do *campus*, segundo a Agenda Ambiental PUC-Rio, passa necessariamente pelo exercício dos valores humanísticos e cristãos que norteiam os princípios da Universidade, como também por ações e soluções técnicas de uma melhor utilização de materiais, incluindo reutilização e reciclagem dos resíduos produzidos.

O consumo de energia de diferentes fontes vem, nos últimos anos, sendo o maior fator no desequilíbrio ambiental. A utilização eficiente de energia com tecnologias adequadas, de baixo consumo, bem como, tornar o consumo de energia sustentável no *campus*, é defendida e estimulada pela Agenda Ambiental. No que se refere ao monitoramento de resíduos, a Agenda ressalta que a Universidade deve monitorar e gerenciar de forma responsável todo o descarte produzido no *campus* e estabelecer políticas claras de reuso e reciclagem (PUC-Rio/Nima, 2009).

A educação ambiental é um processo de transformação dos hábitos insustentáveis existentes na sociedade. Todas as temáticas desenvolvidas pela Agenda Ambiental da PUC-Rio necessitam ser acompanhadas de ações consistentes de educação ambiental, envolvendo a comunidade educativa como agente ativo e transformador do processo. A Universidade deve colaborar na geração de conhecimento, através do ensino e da pesquisa, buscando soluções sustentáveis e promovendo ações criativas que possam ajudar a sociedade nos processos adaptativos decorrentes das mudanças climáticas e na busca de soluções minimizadoras dos atuais e futuros impactos socioambientais. Diante desse desafio, esforços precisam ser canalizados para a construção de sistemas e alternativas ecologicamente corretas e socialmente justas e solidárias (PUC-Rio/Nima, 2009).

É nesse contexto que se insere a proposta de avaliar o potencial do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio em relação ao desenvolvimento e adoção de práticas de ‘Química Analítica Verde’.

Pela importância crescente do tema no cenário mundial e nacional, a proposta de criação de um novo tópico na Agenda (“Tecnologias limpas ou tecnologias verdes”) deverá ser encaminhada pelo PósMQI e pelo Departamento de Química ao

Grupo de Pesquisa Universidade Sustentável da PUC-Rio e ao Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente (Nima) da Universidade. Em caso de aprovação, esse estudo de caso poderá servir de embrião ou estímulo para a proposição de um conjunto mais amplo de ações associadas à Química Analítica Verde que contribuirão para o enriquecimento e materialização da Agenda Ambiental PUC-Rio no ambiente da Universidade.

5.4. Instrumentos da pesquisa de campo

Marconi e Lakatos (2008) recomendam que um instrumento de pesquisa seja testado antes da sua utilização definitiva. Conforme as autoras, alguns exemplares do instrumento devem ser aplicados em uma pequena população escolhida. Nesse sentido, a pesquisadora buscou adaptar para o contexto da PUC-Rio os conteúdos originais das ferramentas de avaliação dos métodos analíticos descritos em capítulos anteriores, submetendo-os previamente a alguns pesquisadores do Departamento, a título de pré-teste.

Os instrumentos de pesquisa adotados na fase de coleta de dados incluem:

- Formulário 1: para a coleta de informações sobre as práticas ministradas no Laboratório de Química Geral;
- Formulário 2: para análise dos ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral segundo os critérios do pictograma *NEMI* e de dois pictogramas complementares (conforme esquema da Figura 4.2; 4.5 e 4.6);
- Formulário 3: para a construção das matrizes *SWOT* referentes às práticas consideradas ‘menos verdes’ (conforme esquema da Figura 4.7);
- Formulário 4: para sugestões de substituição ou modificação de práticas a partir da análise das fraquezas atuais e oportunidades futuras (matrizes *SWOT*).

Os formulários mencionados acima (após a fase de pré-teste) encontram-se no Anexo 1.

5.5. Coleta e tratamento de dados

A coleta de informações e a avaliação dos ‘perfis verdes’ das práticas foi conduzida junto a quatro pesquisadores do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química¹, seguindo-se o fluxograma abaixo (Figura 5.2).

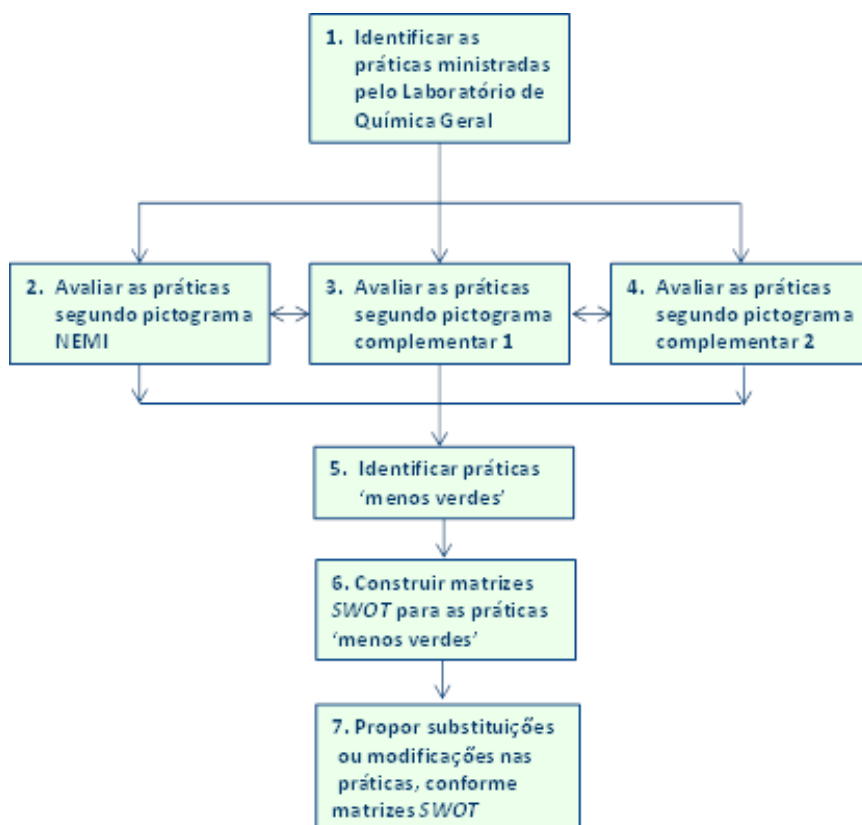


Figura 5.2 – Fluxograma da coleta, tratamento e análise dos dados

Fonte: Elaboração própria.

Nas entrevistas, as seguintes informações foram coletadas:

- conjunto de práticas ministradas no Laboratório de Química Geral e respectivas descrições (Formulário 1);
- julgamentos das práticas analíticas segundo os critérios de ‘perfil verde’ do pictograma *NEMI* e dos pictogramas complementares (Formulário 2);

¹ Professor José Marcus de Oliveira Godoy; Professora Daniela Soluri; Professora Flávia Vieira; e Professora Tatiana D. Saint’Pierre do Departamento de Química da PUC-Rio.

- construção das matrizes *SWOT* para as práticas ‘menos verdes’ (Formulário 3);
- sugestões de substituição ou modificação de práticas ‘menos verdes’, a partir dos resultados das matrizes *SWOT* (Formulário 4).

Com relação ao tratamento dos dados e informações, foi feito uso dos próprios instrumentos de pesquisa para a priorização das práticas, visto que os formulários foram concebidos intencionalmente com uma diagramação visual dos ‘perfis verdes’ para posterior análise. Especificamente, para os dados coletados na etapa 6, foram gerados esquemas gráficos representativos das matrizes *SWOT* das práticas com ‘perfis menos verdes’. As demais informações qualitativas foram organizadas, conforme os campos dos formulários desenhados para a fase de coleta.

5.6.

Análise e discussão dos resultados

Apresentam-se os resultados da avaliação do potencial do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio de desenvolver e adotar práticas com ‘perfil verde’, tendo em vista a inserção de um conjunto de ações na Agenda Ambiental PUC-Rio. Busca-se, nesta seção, responder as questões do estudo de caso enunciadas na seção 5.1, com base na análise e discussão dos resultados obtidos. Nesse sentido, a seção encontra-se estruturada por questão do estudo.

5.6.1.

‘Perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio

Neste item, será respondida a primeira questão deste estudo de caso: “Quais os ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio, segundo sistemática que integra três ferramentas adotadas internacionalmente (pictograma *NEMI* e dois pictogramas complementares ao *NEMI*)?”.

O Quadro 5.2 apresenta os resultados da análise dos ‘perfis verdes’ das práticas em foco. Como pode ser observado, dentre as 12 práticas analisadas, cinco possuem ‘perfis mais verdes’, ou seja, não atendem a pelo menos três

critérios do pictograma *NEMI* (critérios negativos). Do mesmo modo, atendem aos critérios dos pictogramas complementares (critérios positivos). São elas: (i) ‘Medidas, algarismos significativos e erros’; (ii) ‘Gases e o princípio de Avogadro’; (iii) ‘Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre’; (iv) ‘Termoquímica: reações com troca de calor e lei de Hess’; e (v) ‘Cinética química: estudo da velocidade de reação – efeito da concentração’.

A prática ‘Medidas, algarismos significativos e erros’ apresenta ‘perfil verde’ para os quatro quadrantes do pictograma *NEMI*. Por não fazer uso de reagentes e compostos químicos não é ‘PBT’². Adicionalmente, não gera resíduos e não é corrosiva e durante a realização da prática são utilizadas apenas quantidades médias de água.

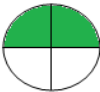
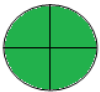
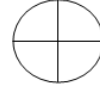
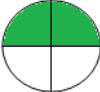
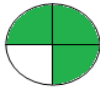
O ‘perfil verde’ da prática ‘Gases e o princípio de Avogadro’ é justificado pelo fato da mesma obedecer aos cinco princípios da Química Verde que são aplicáveis nesse caso. Apesar da utilização de dióxido de carbono durante essa prática, ela apresenta ‘perfil verde’, de acordo com o pictograma *NEMI*. As quantidades de dióxido de carbono empregadas são mínimas, quando se analisam os efeitos de toxicidade. Não há geração de resíduos e o perigo é minimizado pelo uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC).

Quanto à prática ‘Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre’, observa-se que ela só atende ao critério ‘corrosivo’ do pictograma *NEMI*, devido ao uso da substância hidróxido de sódio (NaOH). A prática atende aos cinco princípios da Química Verde aplicáveis.

O ‘perfil verde’ da prática ‘Termoquímica: reações com troca de calor e Lei de Hess’ atende ao critério ‘corrosivo’ do pictograma *NEMI*, por fazer uso de NaOH. Os demais critérios do pictograma *NEMI* não são todos atendidos. Quanto ao pictograma complementar de atendimento aos princípios da Química Verde aplicáveis, a prática apresentada tem perfil verde.

² PBT – Persistente, tóxica e bioacumulativa.

Quadro 5.2 – Análise dos ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química

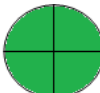
Prática	Pictograma NEMI (*)	Pictograma complementar 1 (**)	Pictograma complementar 2 (***)	SWOT?
Medidas, Algarismos significativos e Erros				Sim
Estequiometria – reação envolvendo gás				Sim
Gases e o princípio de Avogadro				Não
Equilíbrio químico e o princípio de Le Chatelier				Sim
Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base				Sim
Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre				Não

Legenda: (*) Pictograma NEMI: verde – não atendimento ao critério; branco – atendimento (critérios negativos). Ver Figura 4.2;

(**) Pictograma complementar 1 – cor verde – atende ao princípio da Química Verde aplicável; cor vermelha – não atende ao princípio aplicável (Fig. 4.6);

(***) Pictograma complementar 2 – cor verde – baixo; amarelo – médio; vermelho – alto (critério negativo). Ver Figura 4.5.

Quadro 5.2 – Análise dos ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química (cont.)

Prática	Perfil NEMI	Pictograma complementar1	Pictograma complementar 2	SWOT?
Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis				Sim
Titulação de neutralização com indicador condutométrico				Sim
Termoquímica: reações com trocas de calor e Lei de Hess				Não
Cinética química: estudo da velocidade de reação – efeito da concentração				Não
Eletroquímica: reações de oxirredução				Sim
Eletroquímica: células galvânicas				Sim

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

Com relação à prática ‘Cinética química: estudo da velocidade de uma reação- efeito da concentração’, observa-se que ela atende ao critério ‘resíduos’ do pictograma *NEMI*, uma vez que, ao final da reação, gera-se uma quantidade de resíduo pouco acima de 50 g. Os demais critérios do pictograma *NEMI* não são atendidos pela prática em questão. Quanto ao pictograma complementar de atendimento aos princípios da Química Verde aplicáveis, a prática apresenta perfil verde.

As práticas com perfis considerados ‘menos verdes’ são: (i) ‘Estequiometria de reação envolvendo gás’; (ii) ‘Equilíbrio químico e o princípio de Le Chatelier’; (iii) ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’; (iv) ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’; (v) ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’; (vi) ‘Eletroquímica: reações de oxirredução’; e (vii) ‘Eletroquímica: células galvânicas’.

A prática ‘Estequiometria de reação envolvendo gás’ atende aos critérios ‘corrosivo’ e ‘resíduos’ do pictograma *NEMI*. É uma prática considerada corrosiva, devido à utilização de ácido clorídrico (HCl). Além disso, gera resíduo, devido ao emprego de magnésio (Mg). A prática, no entanto, não é ‘PBT’, visto que a mesma utiliza substâncias químicas em baixas concentrações para produzir efeitos tóxicos e perigosos.

Quanto à prática ‘Equilíbrio químico e o princípio de Le Chatelier’, ao ser analisada segundo os critérios do pictograma *NEMI*, atende a todos os quatro critérios. A prática é considerada ‘PBT’ e perigosa, devido ao uso de cobalto; é corrosiva, devido à utilização de NaOH; e gera quantidades de resíduos superior a 50 g.

Com relação à prática ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’, constata-se que é corrosiva, em função do emprego de NaOH. Além disso, gera resíduos em quantidade superior a 50 g.

No que se refere à prática ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’, é considerada ‘PBT’ e ‘perigosa’, devido a utilização de substâncias como mercúrio, bário e chumbo, esta última presente na lista ‘*TRI/PBT Chemical List*’³, da EPA (EUA). Na prática ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’, os critérios ‘PBT’, ‘corrosivo’ e

³ Ver Anexo 2.

‘resíduos’ do pictograma *NEMI* são atendidos, devido ao uso de hidróxido de bário em grandes volumes (200 ml por aula).

A prática ‘Eletroquímica: reações de oxirredução’ é caracterizada como ‘PBT’ e ‘corrosiva’, segundo os critérios do pictograma *NEMI*, devido ao fato de utilizar substâncias contendo chumbo, cobre e zinco. Quanto ao pictograma complementar, a prática não atende ao princípio 5 da Química Verde, aplicável nesse caso. Já na prática ‘Eletroquímica: células galvânicas’, o uso de substâncias como cobre e níquel a tornam ‘PBT’ e ‘corrosiva’ (pictograma *NEMI*).

5.6.2.

Contribuições referentes às práticas analisadas

Nesta seção, será respondida a segunda questão do estudo: “Quais são as práticas hoje ministradas pelo Laboratório de Química Geral, do Departamento de Química da PUC-Rio, que poderão ser modificadas ou substituídas para atender aos princípios da ‘Química Verde’ aplicáveis, aos critérios definidos pelo *Green Chemistry Institute* e critérios complementares?”

Apresentam-se, a seguir, as Figuras 5.3 a 5.10, que representam as matrizes *SWOT* correspondentes às práticas ‘menos verdes’ identificadas na etapa anterior⁴.

Forças (atuais) • Prática com perfil totalmente verde. • Não utiliza reagentes. • Obedece aos cinco princípios da Química Verde aplicáveis ao caso	Fraquezas (atuais) • Desperdício médio de água. • Utilização de termômetros de mercúrio.
Oportunidades (forças futuras) • Substituição dos termômetros de mercúrio por termômetros a álcool. • Redução do consumo de água.	Ameaças (fraquezas futuras)

Figura 5.3 – Matriz *SWOT* referente à prática ‘Medidas, Algarismos Significativos e Erros’

⁴ Por recomendação dos entrevistados, a prática ‘Medidas, Algarismos Significativos e Erros’ foi incluída nesse subconjunto, embora tenha sido classificada como totalmente verde. Na Figura 5.2, há indicação de substituição de termômetros de mercúrio por termômetros a álcool.

Forças (atuais) • Prática simples, de fácil aplicação. • Obedece aos cinco princípios da Química Verde aplicáveis.	Fraquezas (atuais) • Corrosiva, apesar de utilizar solução bastante diluída de ácido clorídrico (HCl). • Geração de resíduos em quantidade reduzida.
Oportunidades (forças futuras) • Após estudos e testes, substituir a solução que torna a prática corrosiva e geradora de resíduos.	Ameaças (fraquezas futuras)

Figura 5.4 – Matriz SWOT referente à prática ‘Estequiometria: reação envolvendo gás’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

Forças (atuais) • Não atende a nenhum critério do pictograma NEMI. • Apesar de apresentar ‘perfil verde’ desfavorável, a prática é de grande importância para demonstração do princípio teórico.	Fraquezas (atuais) • Corrosiva, mas utiliza ácidos bastante diluídos. • Utiliza compostos tóxicos e perigosos em pouca quantidade. • Gera resíduos em pouca quantidade.
Oportunidades (forças futuras) • Após estudos e testes, substituir as reações objeto desta prática por outras que demonstrem o Princípio de Le Chatelier e que sejam menos corrosivas e não utilizem reagentes tóxicos e perigosos.	Ameaças (fraquezas futuras)

Figura 5.5 – Matriz SWOT referente à prática ‘Equilíbrio químico: princípio de Le Chatelier’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

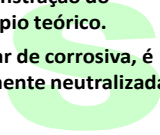
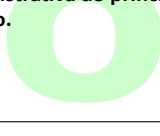
Forças (atuais) • A prática é de grande importância para a demonstração do princípio teórico. • Apesar de corrosiva, é facilmente neutralizada. 	Fraquezas (atuais) • Corrosiva. 
Oportunidades (forças futuras) • Realização de uma única prática com finalidade demonstrativa do princípio teórico. 	Ameaças (fraquezas futuras) 

Figura 5.6 – Matriz *SWOT* referente à prática ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

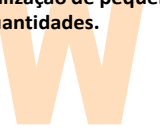
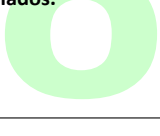
Forças (atuais) • A prática já é miniaturizada. 	Fraquezas (atuais) • Substâncias tóxicas e perigosas, apesar da utilização de pequenas quantidades. 
Oportunidades (forças futuras) • Separar de forma criteriosa os diferentes compostos de resíduos formados. 	Ameaças (fraquezas futuras) 

Figura 5.7 – Matriz *SWOT* referente à prática ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

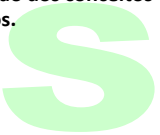
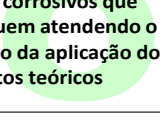
Forças (atuais) • A prática é consagrada e atende aos objetivos de aplicação dos conceitos teóricos. 	Fraquezas (atuais) • Utiliza compostos tóxicos e corrosivos. 
Oportunidades (forças futuras) • Substituição dos compostos atuais por outros menos tóxicos e menos corrosivos que continuem atendendo o objetivo da aplicação dos conceitos teóricos 	Ameaças (fraquezas futuras) 

Figura 5.8 – Matriz SWOT referente à prática ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

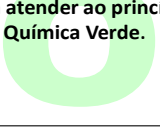
Forças (atuais) • Técnica miniaturizada. • Resíduos reduzidos. 	Fraquezas (atuais) • Não atende ao Princípio 5 da Química Verde aplicável ao caso. 
Oportunidades (forças futuras) • Substituição da prática por outra que utilize solventes alternativos para atender ao princípio 5 da Química Verde. 	Ameaças (fraquezas futuras) 

Figura 5.9 – Matriz SWOT referente à prática ‘Eletroquímica: reação de oxirredução’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

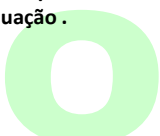
Forças (atuais) • Prática miniaturizada • Resíduos reduzidos. 	Fraquezas (atuais) • Prática apenas demonstrativa (os alunos não executam o experimento). 
Oportunidades (forças futuras) • Dividir as turmas de aulas práticas por curso de graduação. 	Ameaças (fraquezas futuras) 

Figura 5.10 – Matriz SWOT referente à prática ‘Eletroquímica: células galvânicas’

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados das entrevistas com pesquisadores do Departamento de Química da PUC-Rio.

Conforme observado nas respectivas matrizes SWOT, são inúmeras as oportunidades para substituição ou modificação das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral, em especial aquelas que apresentaram perfis ‘menos verdes’, após a avaliação frente aos pictogramas NEMI e complementares.

Para a prática ‘Medidas, algarismos significativos e erros’ (Figura 5.2), recomenda-se a redução do consumo de água e substituição do uso de termômetro de mercúrio por termômetros a álcool, o que eliminará o manuseio de materiais tóxicos no laboratório.

Com relação à prática ‘Estequiometria: reações envolvendo gás’ (Figura 5.3), aponta-se como oportunidade futura, após a realização de estudos e testes, a substituição da solução utilizada, que atualmente torna a prática corrosiva.

No que se refere à prática ‘Equilíbrio químico: princípio de Le Chatelier’ (Figura 5.4), recomenda-se a substituição das reações estudadas por outras que atendam aos princípios da Química Verde aplicáveis nesse caso. Isso com a finalidade de diminuir ou eliminar a quantidade de resíduos gerados e a utilização de compostos tóxicos e perigosos.

Quanto à prática ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’ (Figura 5.5), recomenda-se a realização de uma única prática com finalidade demonstrativa do princípio teórico.

Recomenda-se para a prática ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’ (Figura 5.6) a separação de forma criteriosa dos diferentes compostos e resíduos formados no experimento.

As oportunidades futuras apresentadas para a prática ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’ (Figura 5.7) referem-se à possibilidade de troca dos atuais compostos tóxicos e corrosivos utilizados por outros menos tóxicos e menos corrosivos e que atendam aos objetivos da prática.

Para a prática ‘Eletroquímica: reações de oxirredução’ (Figura 5.8), recomenda-se a substituição por outra que utilize solventes alternativos para atender ao princípio 5 da Química Verde, aplicável nesse caso.

Com relação à prática ‘Eletroquímica: células galvânicas’ (Figura 5.9), recomenda-se reduzir o desperdício de materiais, mediante a divisão das turmas de aulas práticas por curso de graduação. Parte-se do pressuposto que para alguns cursos a execução dessa prática pelos alunos é importante e para outros cursos apenas a demonstração prática dos conceitos e princípios realizada pelo professor seria suficiente.

5.6.3.

Contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio

Nesta seção será respondida a terceira questão do estudo: “Que ações de ‘Química Analítica Verde’ poderão ser inseridas na Agenda Ambiental PUC-Rio, na perspectiva de tornar o *campus* da Universidade mais sustentável e contribuir para o avanço da ‘Química Analítica Verde’ no Brasil?”

Após uma análise de conteúdo dos eixos temáticos em torno dos quais foram elaboradas as diretrizes e metas da Agenda Ambiental PUC-Rio, pode-se perceber que muitas das proposições para curto e médio prazo podem ser alinhadas a estratégias de Química Analítica Verde discutidas nos capítulos 2 e 3. Nesse sentido, identificaram-se três eixos afins com a temática aqui abordada: ‘Materiais,’ ‘Resíduos e ‘Educação Ambiental’.

Com relação ao eixo ‘Materiais’, mais especificamente às diretrizes que visam tornar o uso de materiais sustentáveis no *campus*, desde a origem ao descarte, dentro de princípios de sustentabilidade, identificam-se oportunidades de inserção de iniciativas e ações de curto e médio prazos voltadas para o controle do uso de materiais e reagentes químicos utilizados nas práticas e métodos químicos analíticos conduzidos pelos Departamentos de Química e de Engenharia de Materiais da Universidade. Isso porque, desde a aquisição de materiais até o seu descarte final, deve-se atentar para o descarte correto evitando prejuízos ao meio ambiente.

Quanto ao eixo temático ‘Resíduos’, a Agenda Ambiental ressalta que a Universidade deve monitorar e gerenciar de forma responsável todo o descarte produzido no *campus*, estabelecendo políticas claras que visem à reutilização e à reciclagem. Muitas ações de ‘Química Analítica Verde’ poderão ser alinhadas a essa diretriz, particularmente aquelas relacionadas à estratégia de detoxificação *on-line* dos resíduos gerados durante as atividades de ensino e pesquisa.

Finalmente, para o eixo ‘Educação Ambiental’, identificaram-se várias oportunidades, como será apresentado adiante.

5.7.

Conclusões do estudo de caso

Apresentam-se nesta seção as conclusões do estudo de caso do Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio, com base nos resultados apresentados na seção anterior.

As análises referentes aos ‘perfis verdes’ das práticas em foco permitiram concluir que, dentre as 12 práticas ministradas pelo Laboratório, cinco apresentaram perfis ‘mais verdes, conforme os critérios do pictograma *NEMI* e complementares. São elas:

- ‘Medidas, algarismos significativos e erros’;
- ‘Gases e o princípio de Avogadro’;
- ‘Equilíbrio ácido-base: determinação da concentração de ácido acético no vinagre’;
- ‘Termoquímica: reações com troca de calor e lei de Hess’;

- ‘Cinética química: estudo da velocidade de reação – efeito da concentração’.

Já as práticas com perfis considerados ‘menos verdes’ são:

- ‘Estequiometria de reação envolvendo gás’;
- ‘Equilíbrio químico e o princípio de Le Chatelier’;
- ‘Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base’;
- ‘Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis’;
- ‘Titulação de neutralização com indicador condutométrico’;
- ‘Eletroquímica: reações de oxirredução’;
- ‘Eletroquímica: células galvânicas’.

A sistemática integrada para avaliação dos ‘perfis verdes’ das práticas e métodos químicos analíticos mostrou-se adequada ao propósito pretendido, qual seja avaliar o potencial de adoção pelo Departamento de Química da PUC-Rio de práticas e métodos analíticos mais verdes. A validação empírica da sistemática pelos pesquisadores do Departamento foi muito importante para que se criasse um entendimento comum em relação aos critérios de avaliação praticados em nível internacional. Pela sua simplicidade e formato didático, o desenho da sistemática integrada permitiu a visualização dos ‘perfis verdes’ relacionados a todas as práticas analisadas.

Com relação às propostas de modificação ou substituição de práticas ‘menos verdes’ por alternativas que atendam aos princípios da ‘Química Verde’ aplicáveis e aos critérios do pictograma *NEMI* e pictogramas complementares, pode-se concluir que há um espaço considerável para melhorias relacionadas ao conjunto das 12 práticas hoje ministradas pelo Laboratório de Química Geral. A construção das respectivas matrizes *SWOT* para essas práticas confirmaram a relevância e aplicabilidade da sistemática proposta. Os resultados gerados durante a construção das matrizes *SWOT* permitiram formular as seguintes recomendações:

- substituir termômetros de mercúrio por termômetros a álcool (1 prática);
- substituir reagentes corrosivos, tóxicos ou perigosos por reagentes alternativos que tornem o perfil da prática ‘mais verde’ (3 práticas);

- substituir as reações objeto da prática por outras ‘mais verdes’, segundo os pictogramas utilizados nesta pesquisa, que demonstrem os princípios e conceitos teóricos, mantendo-se os objetivos originais da prática (1 prática);
- separar e identificar de forma criteriosa os diferentes compostos de resíduos formados durante as práticas (1 prática);
- tornar a prática demonstrativa, a ser conduzida uma única vez pelo professor, em casos aplicáveis (2 práticas).

Ao final das análises, procedeu-se a uma reflexão sobre as questões de Química Analítica Verde que deveriam ser endereçadas à coordenação do NIMA para que, em uma futura avaliação da Agenda Ambiental PUC-Rio, possam ser consideradas como parte do escopo da Agenda. Nessa perspectiva, recomenda-se:

- a disseminação da sistemática integrada de avaliação de ‘perfis verdes’ de métodos químicos analíticos nos demais Laboratórios do Departamento de Química e no Departamento de Engenharia de Materiais;
- a elaboração de um plano de ação, em conjunto com os Comitês de QSMS do Departamento de Química, para substituição de reagentes corrosivos, tóxicos ou perigosos por reagentes alternativos que tornem os perfis das práticas e métodos analíticos ‘mais verdes’;
- a implantação de estratégias e boas práticas de Química Analítica Verde, como sensoriamento remoto, emprego de métodos não invasivos e de quimiometria; minituarização; automação; reciclagem, degradação e passivação *on-line*;
- inserção da disciplina ‘Química Analítica Verde’ em grades curriculares de cursos de graduação e pós-graduação de Química e Engenharia Química, Engenharia Metalúrgica e Engenharia de Materiais;
- estruturação de uma linha de pesquisa em educação ambiental com foco em tecnologias limpas, em geral, e em particular em Química Analítica Verde;
- criação de um domínio adicional de Química Analítica Verde em cursos de graduação de Química e Engenharia Química, Engenharia Metalúrgica e Engenharia de Materiais.