

Bernadete Ferreira de Oliveira

Química Analítica Verde:
Contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação).

Orientadores: Prof^a Maria Fatima Ludovico de Almeida
Prof. José Marcus de Oliveira Godoy

Rio de Janeiro
Abril de 2012

Bernadete Ferreira de Oliveira

Química Analítica Verde:
Contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof.^a Maria Fatima Ludovico de Almeida

Orientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. José Marcus de Oliveira Godoy

Co-orientador

Departamento de Química – PUC-Rio

Prof. Maurício Nogueira Frota

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Luis Felipe Guanaes Rego

Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente - PUC-Rio

Prof.^a Maria Alice Zarur Coelho

Escola de Química - UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e de seus orientadores.

Bernadete Ferreira de Oliveira

Graduada em Farmácia com habilitação em Bioquímica pela Universidade Federal do Pará; Farmacêutica Bioquímica do Instituto de Previdência e Assistência do Município de Belém-Pará desde 2004.

Ficha Catalográfica

Oliveira, Bernadete Ferreira de

Química Analítica Verde: contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio / Bernadete Ferreira de Oliveira; orientadores: Maria Fatima Ludovico de Almeida. José Marcus de Oliveira Godoy – 2012.

110 f.: il. (color.); 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2012.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Metrologia – Teses. 2. Sustentabilidade. 3. Desenvolvimento sustentável. 4. Instituições de ensino superior. 5. IES. 6. Campus sustentável. 7. Indicadores de sustentabilidade. 8. Agenda ambiental PUC-Rio. I. Almeida, Maria Fatima Ludovico de II. Godoy, José Marcus de Oliveira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

A Deus, fonte de toda sabedoria e conhecimento.

À minha família, especialmente aos meus pais, irmãos e irmãs que me auxiliaram na busca por esta conquista.

À minha orientadora, Professora Fatima Ludovico pela excelente orientação e constante incentivo na construção deste trabalho de pesquisa.

Ao Professor Reinaldo Calixto de Campos (*in memoriam*) pela disposição em co-orientar esta dissertação ainda na fase do projeto de pesquisa.

Ao Professor José Marcus de Oliveira Godoy pelo prosseguimento na co-orientação e apoio durante a pesquisa de campo, que muito enriqueceram o conteúdo desta dissertação.

Às Professoras Flávia Vieira, Daniela Soluri e Tatiana D. Saint’Pierre do Laboratório de Química Geral, do Departamento de Química da PUC-Rio, pelas informações sobre os ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI) e em especial ao Professor Maurício Frota, pela oportunidade de desenvolvimento profissional e acadêmico.

Aos colegas de turma do PósMQI, com quem compartilho a alegria pela conclusão do curso de mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Metrologia por toda atenção e auxílio dispensados para me ajudar neste trabalho.

Aos amigos Alexandre Nascimento, Isaléa Mizerani e Jaci Serafim pelo apoio e incentivo.

À Capes e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Oliveira, Bernadete Ferreira de. Almeida, Maria Fatima Ludovico de. Godoy, José Marcus de Oliveira. (Orientadores). **Química Analítica Verde: contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio**. Rio de Janeiro, 2012. 110p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo da dissertação é avaliar o potencial do Departamento de Química da PUC-Rio de desenvolver e adotar métodos de Química Analítica Verde, tendo em vista a inserção de um conjunto de ações no escopo da Agenda Ambiental PUC-Rio. No contexto institucional no qual a pesquisa se insere, considera-se que os resultados desta pesquisa terão um grande potencial de aplicação em diversos departamentos da PUC-Rio, em particular no Departamento de Química. Poderá servir de embrião ou estímulo para a proposição de um conjunto de ações que contribuirão para o enriquecimento e materialização da Agenda Ambiental PUC – Rio. Quanto aos fins, a pesquisa pode ser considerada aplicada e descritiva. Quanto aos meios de investigação, a metodologia compreende pesquisa bibliográfica e documental, pesquisa de campo, com entrevistas semi-estruturadas e estudo de caso. Destacam-se como resultados: (i) mapeamento das metodologias analíticas que estão sendo desenvolvidas e empregadas em nível mundial e que vêm contribuindo para o avanço da Química Analítica Verde; (ii) ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral, do Departamento de Química da PUC-Rio, adotando-se ferramentas de avaliação usadas no campo da Química Analítica Verde, em nível mundial; (iii) indicação de práticas que poderão ser modificadas ou substituídas para atender aos princípios da ‘Química Verde’ aplicáveis, aos critérios definidos pelo *Green Chemistry Institute* e critérios complementares; (iv) conjunto de ações de ‘Química Analítica Verde’ que poderão ser inseridas na Agenda Ambiental PUC-Rio.

Palavras-chave

Metrologia; sustentabilidade; desenvolvimento sustentável; instituições de ensino superior; IES; Campus sustentável; indicadores de sustentabilidade; Agenda Ambiental PUC-Rio.

Abstract

Oliveira, Bernadete Ferreira de. Almeida, Maria Fatima Ludovico de. Godoy, José Marcus de Oliveira (Advisors). Rio de Janeiro, **Green Analytical Chemistry: contributions to the PUC-Rio's Environmental Agenda 2012**. 110p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-graduação em Metrologia. Concentration Area: Metrology for Quality and Innovation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this dissertation is to assess the potential of the Chemistry Department at PUC-Rio to develop and adopt Green Analytical Chemistry's methods, within the perspective of contributing for the success of PUC-Rio's Environmental Agenda. Within the institutional context in which this research is situated, it is assumed that its results will have a great potential for application in various departments of PUC-Rio, in particular in the Department of Chemistry. This research can be considered descriptive and applied and the methodology encompasses bibliographical and documental research, field research by mean of semi-structured interviews and case study. The main results can be summarized as follows: (i) survey of analytical methods that have been developed and used worldwide and have contributed to the advancement of Green Analytical Chemistry, (ii) 'green profiles' of the laboratorial practices taught by General Chemistry Laboratory within the Chemistry Department at PUC-Rio; (iii) indication of laboratorial practices that can be improved or replaced by greener ones; (iv) a set of Green Analytical Chemistry's actions to be considered in future revisions of PUC-Rio's Environmental Agenda.

Keywords

Metrology; sustainability; Green Chemistry; Green Analytical Chemistry; National Environmental Methods Index; NEMI; PUC-Rio's Environmental Agenda.

Sumário

1. Introdução.....	12
1.1 Definição do problema de pesquisa.....	15
1.2 Objetivos: geral e específicos.....	16
1.3 Motivação.....	17
1.4 Metodologia.....	18
1.4.1 Fase 1: pesquisa exploratória e descritiva.....	19
1.4.2 Fase 2: pesquisa aplicada.....	20
1.4.3 Fase 3: conclusivo-propositiva.....	20
1.5 Estrutura da dissertação.....	21
2. Química Analítica Verde e sustentabilidade nas instituições de ensino e pesquisa.....	23
2.1 A Química Analítica no contexto do paradigma ecológico da Química....	23
2.2 Compromisso ético com a segurança do analista e com o meio ambiente.....	27
2.3 Princípios da Química Verde e suas relações com a Química Analítica Verde.....	30
2.4 Principais estratégias para implantação da Química Analítica Verde.....	32
2.5 O papel das instituições de ensino e pesquisa no desenvolvimento da Química Analítica Verde.....	36
2.6 Considerações finais sobre o capítulo.....	39
3. Estado-da-arte da Química Analítica Verde.....	40
3.1 Miniaturização como uma estratégia da Química Analítica Verde.....	41
3.2 Miniaturização para tratamento de amostras líquidas.....	42
3.2.1. Técnicas miniaturizadas de extração por solventes.....	43
3.2.2 Técnicas miniaturizadas de extração por sorção.....	45
3.3 Miniaturização de técnicas analíticas para o tratamento de amostras sólidas.....	47
3.3.1 Matriz de dispersão em fase sólida (<i>MSPD</i>).....	47
3.3.2 Melhoramento de técnicas de extração com fluidos/solventes.....	49
3.4 Microssistemas analíticos.....	52
3.5 Automação e técnicas de fluxo.....	52
3.5.1 Análise por injeção em fluxo (<i>FIA</i>) e análise por injeção sequencial (<i>SIA</i>).....	52
3.5.2 Análise em fluxo por multicomutação.....	54
3.6 Tratamento <i>on-line</i> de resíduos.....	54
3.7 Considerações finais sobre o capítulo.....	55

4. Ferramentas de avaliação de métodos de Química Analítica no contexto da Química Verde.....	57
4.1 <i>National Environmental Methods Index (NEMI)</i>	57
4.1.1 Visão geral do <i>National Environmental Methods Index (NEMI)</i>	58
4.1.2 ‘Perfis verdes’ integrados à base de dados <i>NEMI</i>	61
4.1.3 Avaliação de métodos analíticos com uso da base de dados <i>NEMI</i>	63
4.1.4 Características dos métodos analíticos indexados na base de dados <i>NEMI</i>	64
4.2 Pictogramas de ‘perfis verdes’ complementares ao pictograma <i>NEMI</i>	65
4.3 Matriz <i>SWOT</i> para avaliação estratégica de métodos analíticos.....	67
4.4 Sistemática de avaliação integrada de ‘perfis verdes’ de métodos analíticos.....	68
4.5 Considerações finais sobre o capítulo.....	70
5. Estudo de caso: Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio.....	71
5.1 Questões e proposições do caso.....	71
5.2 Tipo de caso: por que estudo de caso único holístico?.....	72
5.3 Unidade de análise e seu contexto.....	74
5.3.1 Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio.....	74
5.3.2 Agenda Ambiental PUC-Rio.....	78
5.4 Instrumentos da pesquisa de campo.....	80
5.5 Coleta e tratamento de dados.....	81
5.6 Análise e discussão dos resultados.....	82
5.6.1 ‘Perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral.....	82
5.6.2 Contribuições referentes às práticas analisadas.....	87
5.6.3 Contribuições para a Agenda Ambiental PUC-Rio.....	92
5.7 Conclusões do estudo de caso.....	93
6. Conclusões e recomendações.....	100
Referências bibliográficas.....	105
Anexos.....	110

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Evolução da produção científica dos temas Química Verde e Química Analítica Verde.....	17
Figura 1.2 - Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos.....	19
Figura 2.1 - Evolução da Química Analítica: período de transição e Química Ecológica.....	26
Figura 2.2 - Principais estratégias de Química Analítica Verde.....	28
Figura 2.3 - Alinhamento das estratégias aos propósitos e objetivos da Química Analítica Verde.....	33
Figura 2.4 - Benefícios e custos de implementação das estratégias de Química Analítica Verde.....	35
Figura 3.1 - Esquema geral de um sistema analítico.....	40
Figura 3.2 - Diferentes níveis de integração entre sistemas analíticos.....	41
Figura 3.3 - Modos de extração utilizados na microextração em fase líquida (LPME): duas fases A e três fases B.....	44
Figura 3.4 - Equipamentos para realização de SPME.....	46
Figura 3.5 - Comparação de cromatogramas de GC-MS de íons obtidos de diferentes combinações de solvente-eluyente em análise de pesticida em insetos.....	48
Figura 3.6 - Equipamentos de extração por micro-ondas, livre de solventes.....	51
Figura 3.7 - Representação esquemática de um sistema de injeção de fluxo.	53
Figura 3.8 - Descontaminação <i>on-line</i> de resíduos.....	55
Figura 4.1 - Página do <i>National Environmental Methods Index</i> na web.....	58
Figura 4.2 - Pictograma representativo do 'perfil verde' segundo <i>NEMI</i>	62
Figura 4.3 - Comparação dos 'perfis verdes' de dois métodos analíticos.....	63
Figura 4.4 - Resultado de busca referente a um analito na base de dados <i>NEMI</i>	64
Figura 4.5 - Pictograma de 'perfil verde' complementar ao pictograma <i>NEMI</i>	66
Figura 4.6 - Pictogramas de 'perfis verdes', segundo os doze princípios da Química Verde.....	67
Figura 4.7 - Aplicação da análise <i>SWOT</i> para Química Analítica Verde.....	68
Figura 4.8 - Representação da sistemática integrada para definição do perfil verde' de um determinado método.....	69
Figura 5.1 - Seleção do tipo do estudo de caso.....	73

Figura 5.2 - Fluxograma de coleta, tratamento e análise dos dados.....	81
Figura 5.3 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Medidas, Algarismos significativos e erros'.....	87
Figura 5.4 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Estequiometria: reação envolvendo gás'.....	88
Figura 5.5 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Equilíbrio químico: princípio de Le Chatelier'.....	88
Figura 5.6 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Equilíbrio ácido-base e indicadores ácido-base'.....	89
Figura 5.7 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Equilíbrio de precipitação: reações com formação de compostos pouco solúveis'.....	89
Figura 5.8 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Titulação de neutralização com indicador condutométrico'.....	90
Figura 5.9 - Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Eletroquímica: reação de oxirredução'.....	90
Figura 5.10 Matriz <i>SWOT</i> referente à prática 'Eletroquímica: células galvânicas'.....	91

Lista de Quadros

Quadro 5.1 - Objetivos e descrição das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio.....	76
Quadro 5.2 - Análise dos ‘perfis verdes’ das práticas ministradas pelo Laboratório de Química Geral do Departamento de Química da PUC-Rio.....	83

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Métodos analíticos da base de dados <i>NEMI</i>	59
--	----