

USO DE MATERIAIS RECICLÁVEIS NA DETERMINAÇÃO GRAVIMÉTRICA DE CO₂ NO AR AMBIENTE E TRATAMENTO DOS RESÍDUOS DE LABORATÓRIO GERADOS

Rosângela da Silva, Fernanda Santos dos Santos e Marçal Pires*

Faculdade de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Av. Ipiranga, 6681, 90619-900 Porto Alegre - RS, Brasil

Recebido em 12/1/12; aceito em 30/5/12; publicado na web em 31/8/12

USE OF RECYCLABLE MATERIALS IN THE GRAVIMETRIC DETERMINATION OF CO₂ IN AMBIENT AIR AND TREATMENT OF LABORATORY WASTE. An alternative system was tested for the determination of CO₂ in air using recyclable materials. The results indicate that the proposed system allows for reliable, accurate, robust and efficient collection, comparable to the standard gravimetric method. Laboratory wastes are easily treated using a filtrate that can be discharged into the sewer and solids that can be reused. The proposed system is a simple and low-cost tool that encompasses important aspects of environmental education, which should be part of the education in chemistry of undergraduate students and technicians.

Keywords: carbon dioxide; air; recyclable.

INTRODUÇÃO

No século passado, a média da temperatura da Terra aumentou em torno de 0,3 a 0,6 °C. As principais substâncias responsáveis pela manutenção da temperatura da superfície da Terra são dióxido de carbono (CO₂) e água. Tanto as atividades antropogênicas como as de fonte natural têm colaborado para o aumento do nível de CO₂ no ar atmosférico.¹⁻⁴

O crescimento econômico resulta em um aumento da emissão de CO₂ na atmosfera.⁵ Boa parte do carbono que estava aprisionado durante milhões de anos (gás natural, carvão e petróleo) está sendo devolvido à atmosfera, através da queima de combustíveis fósseis. Em consequência destas queimas, a concentração de CO₂ na atmosfera aumentou nos últimos anos. As atividades humanas lançam CO₂ na atmosfera em uma velocidade cada vez maior. A concentração de dióxido de carbono subiu 35% entre 2000 e 2008, ao mesmo tempo, os processos naturais que poderiam reduzir esse impacto, como a capacidade de absorção das florestas e principalmente dos oceanos, estão dando sinais de enfraquecimento. Entre 2000 e 2006, atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento contribuíram com o lançamento de 4,1 bilhões de toneladas de carbono na atmosfera, levando a uma taxa de crescimento anual de 1,93 ppmv (partes por milhão expresso em volume). A atual concentração de CO₂ é de 381 ppmv, a maior dos últimos 650 mil anos e provavelmente a maior dos últimos 20 milhões de anos.⁶

A legislação de controle de emissões de poluentes para a atmosfera ainda não tem incluído o controle do dióxido de carbono, embora exista uma grande movimentação para a diminuição destas emissões como, por exemplo, os estudos com relação ao sequestro de carbono^{7,8} além de inúmeros trabalhos de conscientização,⁹⁻¹² contudo ainda há muito a ser feito.

Considerando a importância da educação ambiental e a visão integrada do mundo, no tempo e no espaço, as universidades e escolas técnicas deverão oferecer meios efetivos para que cada aluno compreenda os fenômenos naturais, as ações humanas e sua consequência para o meio ambiente,¹³ incentivando o interesse dos alunos no desenvolvimento de tecnologias mais limpas, propondo atividades que contribuam para a sustentabilidade da biodiversidade

e dos ecossistemas naturais, planejando e agindo de forma a minimizar a geração e emissão de poluentes ao meio ambiente, através do tratamento do melhor aproveitamento dos materiais e seus resíduos.

A necessidade de que os processos educativos estabeleçam diálogos permanentes com situações do cotidiano e dos conteúdos próprios de ensino é uma característica importante, que vem sendo incentivada e defendida tanto por pesquisadores quanto em documentos oficiais de orientação curricular.¹³⁻¹⁶

Este trabalho teve como objetivo propor o desenvolvimento de um sistema prático e barato para a quantificação de CO₂ no ar ambiente, que os próprios alunos poderão construir a partir de materiais recicláveis e, desta forma, criar condições para avaliar as etapas envolvidas durante todo o processo de produção e operação do sistema.

A metodologia do sistema proposto baseia-se no fato de que o CO₂ reage rapidamente com bases para formar bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻). Se os hidróxidos de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH) forem usados, os respectivos carbonatos e bicarbonatos serão formados e solubilizados em água. Como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) possui baixa solubilidade em água,¹⁷⁻¹⁹ inviabiliza o preparo de sua solução. Por outro lado, se o hidróxido de bário (Ba(OH)₂) for usado, resultará na precipitação do carbonato de bário (BaCO₃) que poderá ser determinado gravimetricamente.¹ Recomenda-se o preparo de uma solução diluída de Ba(OH)₂ para a sua utilização nas reações de precipitação com o CO₂, pois o bário é um elemento tóxico, não devendo estar presente em efluentes em concentrações superiores a 5 mg L⁻¹, de acordo com as especificações da legislação vigente.^{20,21} Devido não só a este aspecto, mas também pelo fato desta técnica gerar outros subprodutos, é que este trabalho teve como objetivo adicional avaliar os resíduos de laboratório gerados durante sua execução. Os resíduos líquidos foram analisados quanto à presença dos íons bário (Ba²⁺), amônio (NH₄⁺), nitrato (NO₃⁻) e sulfato (SO₄²⁻), através de cromatografia iônica.

Paralelamente o sistema construído (chamado alternativo A e B) foi comparado com a metodologia padrão,¹ cabendo destacar que esta metodologia já faz parte de uma das aulas experimentais, da disciplina de Química Analítica Ambiental do curso de Química da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) há 4 anos. O sistema alternativo foi incluído nas aulas de graduação há 2 semestres.

*e-mail: mpres@puers.br

Descrição da metodologia padrão gravimétrica

A técnica padrão ou tradicional gravimétrica utiliza materiais de vidro (2 frascos lavadores em série denominados L1 e L2). A Figura 1a apresenta o sistema de coleta do ar do ambiente e a Figura 1b, o processo de filtração. Em cada um dos frascos lavadores são adicionados 150 mL da solução de $\text{Ba}(\text{OH})_2$ $0,195 \text{ mol L}^{-1}$. Os mesmos possuem borbulhadores de vidro sinterizado para passagem e borbulamento do ar coletado. O sistema de coleta é conectado à bomba de vácuo e a um bolhômetro, para a determinação do fluxo inicial e final (que deve estar entre $0,5$ a $1,5 \text{ L min}^{-1}$).

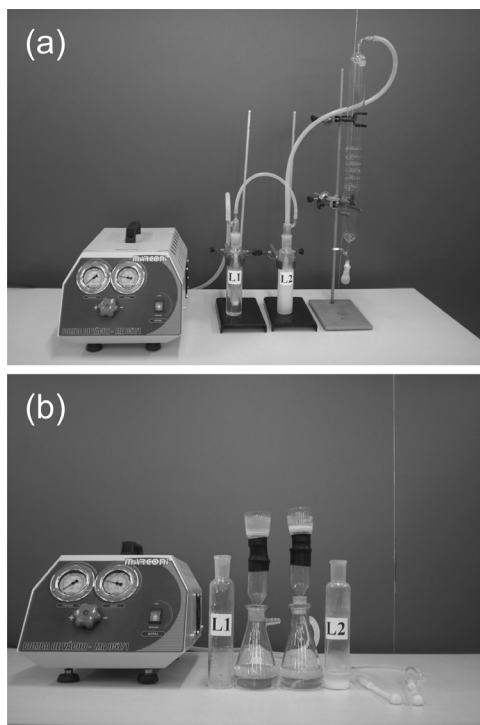


Figura 1. Sistema completo padrão para determinação gravimétrica do CO_2 : (a) coleta do ar do ambiente e (b) filtração

O ar do ambiente é coletado durante 60 min, medindo-se a temperatura ambiente no início e no final da amostragem. Após este período, desconecta-se a bomba de vácuo e deixa-se o sistema em repouso por 10 min para a sedimentação do precipitado formado (BaCO_3). As soluções dos dois frascos lavadores (L1 e L2) são transferidas separadamente para cadinhos filtrantes de vidro sinterizado de porosidade média (previamente secos, pesados e identificados). Os frascos L1 e L2 são, então, lavados com pequenos volumes de uma solução de nitrato de bário $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e o líquido é transferido para os respectivos cadinhos para prevenir que o precipitado se reverta em coloide ou ocorra a sua perda por solubilização. O filtrado obtido nessa etapa (F1) é separado e armazenado em um frasco específico. O precipitado (BaCO_3) é, então, lavado com pequenos volumes da solução de nitrato de amônio (NH_4NO_3) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, para trocar o excesso de bário na superfície do precipitado pelo íon amônio, que é posteriormente perdido na secagem. O filtrado obtido nessa segunda etapa (F2) é também armazenando em um frasco específico. Após os processos de filtração os cadinhos são secos em estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) até peso constante (máximo 2 h) e as massas de BaCO_3 (precipitado) são obtidas por diferença (com as massas iniciais dos cadinhos).

Os resíduos do precipitado de BaCO_3 presentes nos cadinhos, denominados de R1 e R2, são armazenados em frasco plástico identificado e encaminhado para destinação final. Os filtrados (F1 e F2)

são tratados conforme o discutido no item tratamento do resíduo de laboratório.

CONSTRUÇÃO DO SISTEMA ALTERNATIVO DE COLETA PROPOSTO

Material utilizado

Os sistemas alternativos gravimétricos A e B diferenciam-se da técnica padrão por utilizarem em suas construções materiais recicláveis, a saber, 4 garrafas PET - poli(tereftalato de etileno) de 500 mL com 2 tampas comuns e 2 com o sistema abre/fecha. Para a construção do sistema são necessárias também 2 agulhas hipodérmicas de uso veterinário (comprimento em torno de 10 cm), uma bomba pequena de aquário, 2 válvulas tipo T, 2 pedras pome utilizadas em aquários, mangueiras flexíveis de 5 mm de diâmetro interno, cola silicone e tesoura ou estilete. A Figura 2 apresenta o material utilizado para a construção dos sistemas alternativos (A e B). O sistema alternativo B se diferencia do A por trocar a bomba de aquário por uma bomba de vácuo. Para a determinação da pressão atmosférica deve-se utilizar um barômetro, porém para locais que se situam próximos ao nível do mar pode-se considerar para efeitos de simplificação dos cálculos a pressão atmosférica igual a 1 atm.

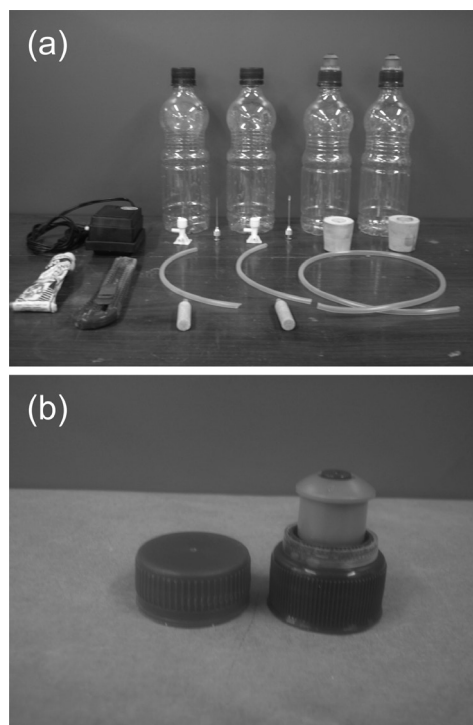


Figura 2. (a) Materiais necessários e preparo dos sistemas alternativos e (b) destaque para a tampa comum e abre/fecha

Construção dos sistemas alternativos A e B

As garrafas PET são cortadas transversalmente na altura de aproximadamente 6 cm a partir de sua base. A seguir, as partes que possuem as aberturas referentes a tampas são unidas com silicone, formando dois frascos lavadores abertos (L3 e L4, para o sistema alternativo A; L5 e L6 para sistema alternativo B). Na extremidade superior é colocada a tampa comum e na inferior, a tampa tipo abre/fecha, conforme Figura 1S (material suplementar). A Figura 2S (material suplementar) apresenta as adaptações realizadas nas tampas: a) e b) comum e c) e d) abre/fecha.

No centro da tampa comum é adaptada a válvula tipo T e mais para a lateral, a agulha hipodérmica veterinária (Figura 2Sa, material suplementar). Na base externa da agulha é conectada uma mangueira flexível com 50 cm de comprimento, a qual permite a passagem do ar residual presente no 1º frasco lavador (L3, L5) para o 2º frasco lavador (L4, L6). Na válvula tipo T, na parte inferior (Figura 2Sb, material suplementar) são adaptados 16 cm da mangueira, contendo na extremidade oposta a pedra pome (responsável pelo borbulhamento do ar na solução reagente). A Figura 2Sc (material suplementar) mostra a tampa abre/fecha, papel filtro (cortado no tamanho do diâmetro interno da tampa abre/fecha) para a retenção dos precipitados formados durante a reação e uma rolha de borracha para tampa abre/fecha no suporte de apoio do frasco lavador ou no funil de kitazato para a filtração. Na Figura 2Sd (material suplementar) pode ser vista a tampa abre/fecha já com o filtro colocado ao lado da rolha com orifício aberto para a adaptação da tampa com o filtro.

A Figura 3S(a e b, material suplementar) apresenta uma vista geral das adaptações realizadas nas tampas e um frasco pronto fixado em uma das metades que sobraram durante os cortes das garrafas PET, respectivamente.

O ar é coletado com o auxílio de uma bomba de aquário (sistema A) ou com uma bomba de vácuo (sistema B), ambos conectados na válvula T do frasco lavador L3 ou L5. A Figura 3 apresenta o sistema alternativo A em funcionamento, onde em (a) é mostrada a coleta do ar e em (b) o processo de filtração em trompa d'água.

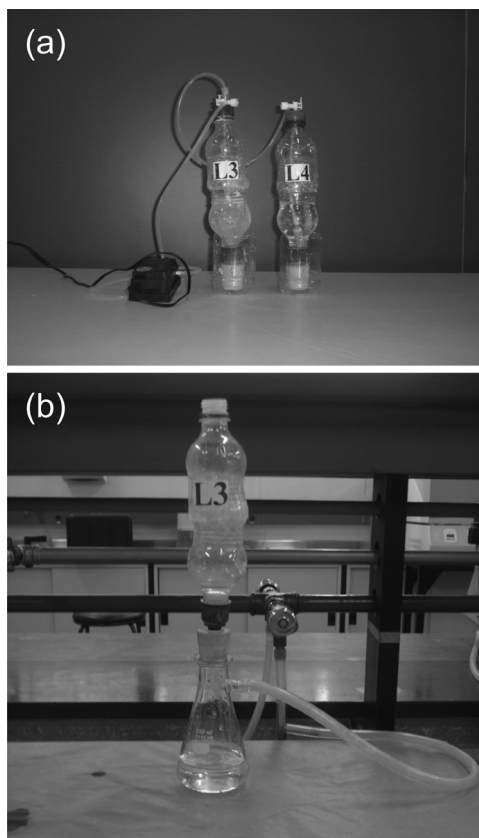


Figura 3. Sistema alternativo A em funcionamento: (a) coleta do ar do ambiente e (b) filtração

PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM DO AR

Inicialmente, pesam-se as tampas abre/fecha com o filtro (balança analítica, 0,1 mg) previamente secas a 70 °C por 12 h. Nos dois frascos lavadores (L3 e L4; L5 e L6), já com as tampas

pesadas e fechadas, adicionam-se 150 mL da solução de Ba(OH)₂ 0,195 mol L⁻¹ em cada um. Imediatamente fecham-se os dois frascos na parte superior com as tampas comuns adaptadas conectando-se L3 a L4 e L5 a L6, em série, com as mangueiras flexíveis, sendo em uma delas conectada a bomba de aquário ou de vácuo e à outra, a válvula T. Os dois sistemas alternativos A e B são deixados por 60 min em reação, devendo-se verificar o fluxo (com auxílio de um bolhômetro) e a temperatura do ar ambiente no início e no final. Transcorrido o tempo de reação, o sistema deve permanecer em repouso por 10 min para sedimentação do precipitado. Depois, deve-se proceder à filtração por pressão reduzida com auxílio de um kitazato; em seguida, lavar os precipitados com solução de Ba(NO₃)₂ 0,1 mol L⁻¹ para dentro de uma garrafa PET 600 mL (F3, F5) e reservar. A seguir, lavar os precipitados com pequenos volumes da solução de NH₄NO₃ 0,1 mol L⁻¹ para dentro de outra garrafa PET de 600 mL (F4, F6) e reservar. Os filtrados F3, F4, F5 e F6 são tratados semelhantemente aos filtrados F1 e F2.

As tampas com os precipitados devem ser colocadas em estufa a 70-80 °C por 12 h. Após este tempo, transferir para um dessecador e levar a peso constante, obtendo-se a massa BaCO₃ por diferença. A massa de BaCO₃ assim obtida é denominada de resíduo sólido R3, R4, R5 e R6 referentes aos valores de precipitados dos frascos lavadores L3, L4, L5 e L6, respectivamente. Esses resíduos são misturados ao frasco plástico contendo os resíduos sólidos R1 e R2 e tratados semelhantemente.

CÁLCULOS DA CONCENTRAÇÃO DE CO₂

A partir da massa total de BaCO₃ obtida na reação gravimétrica padrão (somatório das massas obtidas nos 1º e 2º frasco lavador), calcula-se por estequiometria a quantidade de matéria do CO₂ coletados. Para obter-se a quantidade de matéria de ar do ambiente que passou pelo sistema de coleta, utiliza-se a equação dos gases ideais rearranjada, de acordo com a Equação 1:

$$n = \frac{RT}{PV} \quad (1)$$

onde n é quantidade de matéria de ar ambiente; P a pressão (em atm); T a temperatura (em K); R a constante universal dos gases (0,08205 atm L mol⁻¹ K⁻¹) e V o volume de ar coletado (em L).^{22,23} Para os cálculos deve-se considerar a temperatura e pressão médias durante o experimento; se a pressão atmosférica não for medida pode ser considerada como 1 atm. Para encontrar o volume deve-se utilizar o fluxo de ar e o tempo de amostragem. A concentração de CO₂ em ppmv (partes por milhão, molar ou volumétrico) pode ser calculada pela expressão, dada pela Equação 2:

$$[CO_2] = \frac{\text{quantidade de matéria } CO_2}{\text{quantidade de matéria ar}} \times 10^6 \quad (2)$$

A concentração de CO₂ também pode ser expressa em µg m⁻³ e ppm mássico, quando se utilizam as devidas correlações.

Para verificar a eficiência do sistema da coleta calculam-se os percentuais das massas dos precipitados gerados no 1º e 2º frascos lavadores em série, em relação à massa total de BaCO₃ obtida no teste. Se o percentual recuperado for < 80%, a eficiência de coleta do CO₂ no primeiro frasco lavador é inadequada, não havendo garantia que o 2º frasco lavador reterá o restante do CO₂ com a eficiência desejada (~100%). Nesse caso, devem ser feitas modificações para evitar a perda de CO₂ contido no ar ambiente, com a conseqüente subestimação da sua concentração. É utilizado igual procedimento para o cálculo de CO₂ para os sistemas alternativos A e B.

TRATAMENTO DO RESÍDUO DE LABORATÓRIO

O filtrado 1 (F1, F3 e F5), contendo os excessos da solução de $\text{Ba}(\text{OH})_2$ e $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, e o filtrado 2 (F2, F4 e F6), podendo conter ainda resíduo da lavagem com o $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, são tratados com H_2SO_4 diluído a 10%, que irá neutralizar a base e também formar um precipitado insolúvel de sulfato de bário (BaSO_4). Após decantação e a certificação de que a precipitação foi completa (adição de excesso de H_2SO_4), os efluentes tratados são filtrados (papel filtro comum) gerando os filtrados finais (FF1 e FF2) e material sólido (BaSO_4). O BaSO_4 é transferido para um vidro de relógio e seco em estufa (105 °C, 2 h). Os filtrados dessa etapa (FF1 e FF2) são analisados, conforme procedimento descrito a seguir, e enquadrando-se dentro das especificações ambientais regulamentares, são descartados de forma segura no esgoto doméstico.

Análise dos filtrados finais (FF1 e FF2)

Para a determinação dos íons de interesse foi utilizado um cromatógrafo iônico com detecção por condutividade elétrica (Dionex 300) e supressão eletroquímica. Os ânions nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) foram separados utilizando-se uma pré-coluna Ion Pac AG9-HC (Dionex, 50 x 4 mm) e coluna AS9-HC (Dionex, 250 x 4 mm), em sistema de eluição isocrática com eluente Na_2CO_3 9 mmol L^{-1} , fluxo de 1,0 mL min^{-1} , volume de injeção de 50 μL e supressora eletroquímica ASRS-300 (Dionex 4 mm, corrente 50 mA). Os cátions amônio (NH_4^+) e bário (Ba^{2+}) são determinados utilizando a mesma técnica, com pré-coluna CG12A (Dionex, 4 x 50 mm), coluna IonPAC CS12A (Dionex, 4 x 250 mm), em sistema de eluição isocrática com eluente H_2SO_4 22 meq L^{-1} , fluxo de 1,0 mL min^{-1} , volume de injeção de 50 μL . Nessas condições, os íons de interesse apresentaram limite de detecção < 0,1 mg L^{-1} e precisão entre replicatas da ordem de 2%.

Após verificação se as concentrações dos ânions e cátions de interesse encontram-se dentro do permitido pela legislação ambiental,^{20,21} o pH dos filtrados (FF1 e FF3) deve ser corrigido para a faixa entre 5 a 9, podendo ser então descartados no esgoto doméstico.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os resultados da concentração de CO_2 obtidos pelos sistemas padrão (P) e alternativos (A e B). Os valores médios encontrados estão dentro dos limites descritos na literatura (cerca de 400 ppmv)²⁴⁻²⁶ em ambientes internos ventilados. De acordo com o teste t aplicado aos três sistemas avaliados, verifica-se que não são discordantes entre si, pois não apresentam diferenças significativas. Cabe destacar que o histórico de 5 semestres de resultados obtidos com o sistema padrão, em aulas práticas, indica valores coerentes com os obtidos neste estudo.

Comparando-se os sistemas alternativos com o padrão gravimétrico constata-se que o sistema A (bomba de aquário) apresenta

Tabela 1. Concentrações de CO_2 (ppmv) determinadas por meio dos diferentes sistemas testados

Dados	Alternativo A	Alternativo B	Padrão
Replicata 1	451	261	392
Replicata 2	366	408	441
Replicata 3	391	383	501
Média	403	351	445
Desvio Padrão	44	79	55
Variacão (%)	11	23	12
Teste t			
t experimental	1,04	1,70	
t teórico (p<0,05)	2,78	2,78	

menor desvio padrão (44 ppmv), enquanto que nos sistemas B e P, que utilizam bombas de vácuo, os desvios são maiores e próximos (79 e 88 ppmv, respectivamente). A menor variação encontrada para o sistema A pode ser atribuída ao fluxo da bomba de aquário estar menos sujeito a oscilações durante a reação. Isso foi verificado experimentalmente por meio da medição dos fluxos e avaliação visual, durante a coleta. Em geral, o fluxo da bomba de aquário se manteve praticamente constante ($0,5 \pm 0,1$ L min^{-1}) enquanto que a bomba de vácuo apresenta maior variação ($1,0 \pm 0,5$ L min^{-1}), com fluxos menores ao final do experimento ($0,8 \pm 0,5$ L min^{-1}).

Após lavagem e secagem, o sistema de coleta proposto foi reutilizado em diversos experimentos em aulas práticas. Os resultados obtidos foram satisfatórios indicando que os materiais reciclados e o processo de montagem utilizado são robustos e eficientes para o uso continuado.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos percentuais de eficiência de coleta do CO_2 em cada frasco lavador, para os três sistemas avaliados. Verificou-se que os sistemas Padrão e Alternativo A apresentam eficiências de coleta superior a 80% no primeiro frasco (L1 e L3). Esse valor é considerado adequado para a coleta com dois frascos lavadores. Por outro lado, o sistema alternativo B apresentou a menor eficiência de coleta (63%) provavelmente devido à deformação do primeiro frasco de coleta (L5) pela ação do vácuo. Esse artefato provocou a passagem de maior quantidade de CO_2 para o segundo frasco lavador (L6 = 37%) que pode acarretar perdas do analito, caso o CO_2 não seja totalmente retido nesse frasco lavador. Esse comportamento pode explicar as menores massas de BaCO_3 medidas no teste utilizando o sistema Alternativo B.

Em função dos resultados obtidos recomenda-se a utilização do sistema Alternativo A para a determinação de CO_2 no ar ambiente em aulas de química ambiental para estudantes do ensino superior ou técnico em química e em meio ambiente.

Tabela 2. Comparação das massas do BaCO_3 precipitado e valores percentuais de recuperação, em cada um dos frascos lavadores, entre os sistemas Padrão, Alternativos A e B

Fracos	Padrão		Alternativo A		Alternativo B	
	Massa	Recup.	Massa	Recup.	Massa	Recup.
Lavadores	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
1°	0,1150	84	0,0901	97	0,0528	63
2°	0,0221	16	0,0030	3	0,0314	37
Total	0,1371		0,0931		0,0842	
Fluxo ar (L min^{-1})	0,56		0,54		0,43	

Tratamento e caracterização dos resíduos de laboratório

Os resíduos de laboratório (FF1, FF2) tratados com ácido sulfúrico foram analisados por cromatografia iônica, não tendo sido verificada a presença de íons Ba²⁺ (Limite de Detecção, LD = 0,005 mg L⁻¹). Esse resultado indica que o tratamento é eficiente para a remoção dos íons bário, o qual tem padrão de emissão de 5 mg L⁻¹.^{20,21}

Por outro lado, verificou-se no filtrado FF1 a presença de 0,38 mg L⁻¹ de NO₃⁻ não sendo detectado os íons NH₄⁺ e SO₄²⁻. Para o filtrado FF2 foram encontrados 7,65; 8,38 e 11,97 mg L⁻¹ de NO₃⁻, NH₄⁺ e SO₄²⁻, respectivamente. A maior concentração de NO₃⁻ e SO₄²⁻ para o filtrado FF2 deve-se ao fato da lavagem ter sido feita com maior volume de NH₄NO₃ e pela adição de H₂SO₄ diluído, que favorece a reação de sulfato de amônio (NH₄)₂SO₄, cujos íons permanecem em solução aquosa devido a sua elevada solubilidade (1,877 g L⁻¹ a 20 °C).^{18,19} Cabe salientar que as concentrações medidas estão abaixo do limite de emissão para nitrogênio amoniacal total (25,70 mg L⁻¹ NH₄⁺), enquanto que sulfato e nitrato não apresentam padrões de emissão de efluente na legislação federal.^{20,21} Esses resultados comprovam que o tratamento de resíduos é eficiente e que, após ajustar o pH do efluente tratado para a faixa de 5 a 9, o mesmo pode ser descartado no esgoto doméstico.

CONCLUSÕES

Os sistemas alternativos propostos, para a determinação do CO₂ no ar ambiente, mostraram-se de fácil construção e de baixo custo devido à utilização de materiais recicláveis. Os valores de concentração de CO₂ obtidos com os sistemas alternativos A e B (403 e 351 ppmv, respectivamente) foram concordantes com o sistema gravimétrico padrão (368 ppmv). Entretanto, o sistema A apresentou melhor precisão, acuracidade, robustez e eficiência de coleta, quando comparado ao sistema B.

Os resíduos de laboratório são de fácil tratamento, com solução diluída de ácido sulfúrico, gerando um filtrado com teores dos íons de interesse (Ba²⁺ e NH₄⁺) abaixo dos padrões de emissão de efluente na legislação federal.^{20,21} Após ajuste de pH (entre 5 a 9) o mesmo pode ser descartado no esgoto doméstico. Os resíduos sólidos gerados devem ser armazenados adequadamente, podendo ser reutilizados em outros experimentos.

Finalmente, cabe destacar que o sistema proposto é uma ferramenta simples e de baixo custo, que abrange aspectos importantes da educação ambiental, que devem estar presentes na formação de alunos do ensino superior ou profissionalizante.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Está disponível em <http://quimicanova.s bq.org.br>, em arquivo pdf, com acesso livre. As Figuras S1 a S3 contêm as etapas necessárias para o entendimento da montagem dos sistemas alternativos de coleta do ar ambiente.

AGRADECIMENTOS

À PUCRS, Rede Carvão Mineral/CNPq e FAPERGS pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

- Boehnke, D. N.; Delumyea, R. D.; *Laboratory Experiments in Environmental Chemistry*, Prentice-Hall, Inc: New Jersey, 2000, experiment 22.
- Ueda, A. C.; Tomaz, E.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 1496.
- Migliavacca, D.; Teixeira, E. C.; Pires, M.; Fachel, J.; *Atmos. Environ.* **2004**, *38*, 1641.
- Silva, R.; Pires, M.; Azevedo, C. N.; Fagundes, L.; Garavaglia, L.; Gomes, C. J. B.; *Int. J. Coal Geol.* **2010**, *84*, 269.
- Caetano, M.; Gherardi, D. F. M.; Yoneyamac, T.; *Ecol. Model.* **2008**, *213*, 119.
- <http://noticias.terra.com.br/ciencia/interna/0,,OI2013134-EI8278,00.html>, acessada em Janeiro 2012.
- Forbes, S. M.; Verma, P.; Friedmann, S. J.; Curry, T. E.; Wade, S. M.; Venezia, J.; *Energy Procedia* **2009**, *1*, 1759.
- Pollaka, M.; McCoy, S. T.; *Energy Procedia* **2011**, *4*, 5917.
- Hassan, A.; Ismail, M. Z.; *Procedia Soc. Behav. Sci.* **2011**, *15*, 3404.
- Farias, L. A.; Favaro, D. I. T.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 1089.
- Braga, T. P.; Pinheiro, A. N.; Valentini, A.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 792.
- Machado, A. A. S. C.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 535.
- Lindemann, R. H.; *Quim. Nova* **2007**, *30*, 2043.
- Brasil, Ministério da Educação e do Desporto, Secretaria de Ensino Médio e Tecnológico; *Parâmetros Curriculares Nacionais: ensino médio*, Brasília, 1999.
- Brasil, Ministério da Educação e do Desporto, Secretaria de Ensino Médio e Tecnológico; *PCN + ensino médio: orientações curriculares complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza Matemática e suas Tecnologias*, Brasília, 2002.
- Simoni, D. A.; Andrade, J. C.; Simoni, J. A.; *Quim. Nova* **2011**, *34*, 1818.
- Skoog, D. A.; West, D. M.; Hooller, F. J.; *Fundamentos de Química Analítica*, 8ª ed., Thompson: São Paulo, 2005.
- Harris, D. C.; *Análise Química Quantitativa*, 5ª ed., W.H. Freeman and Company: New York, 2001.
- Russel, J. B.; *Química Geral*, 2ª ed., Pearson Makron Books: São Paulo, 2006.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA; *Resolução n. 357*, de 17/3/2005.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA; *Resolução n. 397*, de 3/4/2008.
- Atkins, P.; Jones, L.; *Princípios de Química Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente*, 3ª ed., Bookman: Porto Alegre, 2006.
- Atkins, P.; *Físico-Química*, 6ª ed., LTC- Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A: Rio de Janeiro, 1999.
- Harrison, R. M.; *Pollution. Causes, effects e control*, 2ª ed., The Royal Society of Chemistry: Cambridge, 1992.
- Henderson-Sellers, B.; *Pollution of our atmosphere*, Adam Hilger: Bristol, 1984.
- Henry, J. G.; Heinke, G. W.; *Environmental science and engineering*, Prentice- Hall: New Jersey, 1989.