
EL PAPEL DE LA QUÍMICA ANALÍTICA EN LAS CIENCIAS AMBIENTALES

THE ROLE OF ANALYTICAL CHEMISTRY IN ENVIRONMENTAL SCIENCES

María A. Dosal¹, Mercedes G. Llano¹

(1) Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Facultad de Química. Ciudad Universitaria, D.F.,
Delegación Coyoacán, C.P. 04510 - México
(e-mail: madosala@yahoo.com; llano@unam.mx)

Recibido: 21/02/2014 - Evaluado: 09/04/2014 - Aceptado: 22/07/2014

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta para abordar la didáctica de la Química Analítica con enfoque de Química Sostenible y de Control de Calidad. Esta propuesta considera un conocimiento razonado de la reactividad química y el diseño de experiencias prácticas representativas de equilibrios químicos en las que se utilicen técnicas comunes para análisis cuantitativo; las experiencias que se proponen fueron diseñadas de acuerdo con los Principios de la Química Verde buscando iniciar al futuro profesional en el diseño de procesos químicos escalables a nivel industrial y acordes con los requerimientos de una civilización sostenible; todas fueron probadas y aceptadas por estudiantes de licenciatura y posgrado.

ABSTRACT

This work presents a proposal to deal with analytical chemistry focused on Sustainable Chemistry and Quality Assurance. The proposal considers a reasoned knowledge of the chemical reactivity, and the design of practical representative experiences of chemical equilibriums that use common techniques for quantitative analysis; the proposed experiences were designed according to the principles of Green Chemistry to initiate the professionals in designing scalable chemistry processes at an industrial level, according to requirements of a sustainable civilization. All the proposed experiences were tested and accepted by undergraduate and graduate students.

Palabras clave: química analítica sostenible; química analítica verde; química ambiental; enseñanza de la química analítica

Keywords: sustainable analytical chemistry; green analytical chemistry; environmental chemistry; analytical chemistry teaching

INTRODUCCIÓN

La Ciencia en general y la Química en particular tienen una misión importante a cumplir relacionada con la resolución de los problemas prácticos de cada día. A fin de poder controlarlos, utilizarlos o transformarlos para el bienestar de la sociedad es necesario estudiar, analizar y comprender el por qué de los fenómenos que suceden a nuestro alrededor. Con este objetivo la Química se debe orientar en tres direcciones: a) a la relación entre ciencia, tecnología y sociedad, b) como ciencia pura y c) como ciencia aplicada. En esta última dirección es donde usualmente se inserta el dominio de la Química Ambiental, cuya acción fundamental es el estudio y solución de los problemas relacionados con la conservación del medio ambiente (García & Dobado, 2008; Pence & Kirchhoff, 2013). En este campo es cada vez más importante su relación con los problemas de control de residuos sólidos, emisiones a la atmósfera, depuración de aguas y tratamiento de aguas residuales.

Para estas aplicaciones es evidente la importancia que adquiere la Química Analítica en lo que concierne al Análisis Químico e Instrumental, campo que corresponde al usual concepto de la Química Analítica, entendida como la rama de la Química que tiene como finalidad el estudio, mediante diferentes métodos, de la composición química de un material o muestra (Harris, 2005).

Sin embargo el papel de la Química Analítica no se limita a este tradicional campo del análisis y su contribución a una química ambiental sostenible es fundamental para aplicar la filosofía de trabajo de la denominada Química Verde cuyo objetivo es optimizar los procesos químicos industriales, eliminando la formación de productos secundarios y estableciendo condiciones de trabajo menos agresivas (Kirchhoff, 2001). La contribución de una química analítica verde es importante tanto en el campo del análisis químico e instrumental (Ivanova & Detcheva, 2012) como en el de la predicción de reacciones en escala preparativa o industrial.

En ambos casos se requiere conocer, razonar y aplicar principios teóricos fundamentales; en efecto, los principios teóricos son idénticos y aplicables aunque los aspectos técnicos sean diferentes. Para cualquier tipo de problema, sea industrial o de laboratorio, un razonamiento previo permite minimizar el número de experiencias de prueba y ensayo y optimizar las reacciones químicas involucradas. De ahí su importancia para el desarrollo de una Química Analítica Verde y, en consecuencia, la necesidad de abordar la didáctica de esta disciplina con un enfoque sostenible, objetivo fundamental de esta propuesta.

En este proceso de aprendizaje de la Química Analítica es necesario examinar los conceptos termodinámicos básicos que se aplican a las disoluciones y es de fundamental importancia el conocimiento de cómo optimizar los equilibrios químicos para lograr reacciones selectivas con ahorro de reactivos y baja producción de residuos.

Esta concepción de los métodos de enseñanza de una química analítica razonada, significó una revolución en el mundo entero y fue iniciada en la década de los años 70 por la escuela francesa encabezada por el doctor Charlot (1971), para quien la química analítica "era ante todo una formación para el espíritu, con la finalidad de saber tomar partido de los conocimientos generales, para resolver -eficaz y rápidamente- problemas prácticos variados" (Trémillon, 1998).

El Profesor Charlot defendió toda su vida que la formación en Química Analítica permitía ir mucho más lejos que la realización de un método de análisis que, por muy validado y preciso que sea, queda en el ámbito del análisis químico. El prestigio de sus métodos de enseñanza se ganó, sobre todo, por su aplicación a la Química Industrial; en efecto, esta formación no es válida únicamente para la explotación clásica, casi banal, del dominio del análisis químico clásico (titulaciones, gravimetrías y preparación de muestras), sino que permite una explotación mayor en el sector de procedimientos industriales (hidrometalurgia, síntesis, electrosíntesis y purificaciones orgánicas y minerales).

Esta estrategia didáctica considera el estudiar, uno por uno, los equilibrios simples que ocurren en solución acuosa (óxido-reducción, complejos, ácido-base, solubilidad y precipitación, extracción e intercambio iónico)

para acercarse más adelante al estudio de las reacciones que en la práctica ocurren en forma simultánea y en otros disolventes no acuosos.

Al respecto, cabe señalar que a pesar de que el agua sea considerada como el disolvente en cuyo seno se efectúan variados procesos, su empleo como disolvente tiene limitaciones y muchas operaciones químicas o electroquímicas realizadas en laboratorios o industrias tienen que ser efectuadas en medios no acuosos: sales fundidas, disolventes orgánicos y mezclas de disolventes (Charlot, 1971; Tremillón, 1997). Los razonamientos que se utilizan en medio acuoso sirven de base para abordar también el estudio de la reactividad y la selectividad en estos medios.

Todo lo anteriormente mencionado justifica el importante papel que una química analítica verde tiene en el campo de las ciencias ambientales.

JUSTIFICACIÓN

Para entender la razón de nuestra propuesta didáctica es necesario considerar que la gran mayoría de los procesos químicos involucran transferencia de electrones y que, para que las reacciones ocurran, los reactantes deben encontrarse disueltos en cualquier disolvente y a cualquier temperatura. Por ello es evidente la importancia de la enseñanza de aspectos químicos fundamentales relacionados con la reactividad química (equilibrios redox y de solubilidad) y con la selectividad (equilibrios ácido-base y de complejos). El estudio de los equilibrios de solubilidad es también fundamental por su aplicación en técnicas de separación; otros equilibrios igualmente importantes para este último fin son la extracción y el intercambio iónico (Dosal & Llano, 2011).

Los ejemplos teóricos deben ser dirigidos hacia la comprensión de las diferentes aplicaciones de los principios de la Química Analítica en diversos ámbitos. Siguiendo una secuencia lógica, en los cursos subsecuentes se deben incluir también los principios y posibles aplicaciones de los principales métodos de análisis instrumental y no olvidar la importancia que las reacciones químicas también tienen en muchos de ellos: preparación de muestras, derivatización, equilibrios de distribución, etc. (Braun *et al.*, 2006; Ivanova & Detcheva, 2012).

La literatura consultada (Namieśnik, 2001; Armenta *et al.*, 2008; Tobiszewski *et al.*, 2010) muestra que la única preocupación actual en el ámbito de la Química Analítica Verde se limita al campo del Análisis Químico llegando incluso a formularse los Doce Principios de la Química Analítica Verde (Gałuszka *et al.*, 2013); en esta bibliografía el énfasis se centra fundamentalmente en técnicas de preparación de muestras amigables al ambiente evitando disolventes y reactivos tóxicos y en la miniaturización y automatización como forma de disminuir cantidades de reactivos y residuos. Por ello se requiere una enseñanza dinámica teórico-práctica que permita la resolución de problemas de cualquier índole y que incluya técnicas clásicas e instrumentales de análisis; en todos los casos debe considerarse la importancia de predecir las condiciones de trabajo buscando la selectividad y la economía del átomo para reducir el número de experimentos a realizar en el laboratorio.

Es importante subrayar que aunque este tipo de trabajo requiere de cantidades de reactantes pequeñas, la experiencia práctica que se adquiera permitirá también la predicción de reacciones en mayor escala ya que, como se ha mencionado, los aspectos puramente químicos son idénticos aunque los tecnológicos sean diferentes.

El objetivo del presente estudio es proponer experiencias prácticas que permitan a los alumnos comprender la importancia de la Química Analítica como medio de prevención de riesgos ambientales.

METODOLOGÍA

Se diseñaron diversos protocolos experimentales (Dosal & Llano, 2011) de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Procurar que el trabajo experimental fuera representativo de dos aspectos: el equilibrio químico en disolución y las técnicas más comunes que se utilizan en análisis cuantitativo.

2. Utilizar materiales de uso normal en un laboratorio y técnicas comunes para análisis con fines cuantitativos.
3. Interpretar los resultados de acuerdo a los criterios de calidad exigidos por la normatividad vigente (Eurachem, 2012).
4. Buscar el enfoque de una Química Sostenible para lo cual todas las experiencias diseñadas fueron analizadas de acuerdo con los Principios de la Química Verde propuestos por Anastas y Warner (2008).
5. Integrar en cada uno de los protocolos un diagrama ecológico que considera el grado de "acercamiento verde" (Morales *et al.*, 2011) de cada una de las etapas del proceso para lo cual se asoció a cada una de ellas un color que va desde el verde hasta el café (pasando por el amarillo) que significa un mayor o menor acercamiento verde.

A título de ejemplo se describe a continuación uno de los protocolos diseñados el cual corresponde a una experiencia práctica de equilibrio de óxido reducción utilizando un fotómetro. El fundamento del método se basa en el conocimiento de las propiedades reductoras del ácido ascórbico que le permiten ser oxidado por una disolución de yodo/yoduro; al igual que en todas las experiencias prácticas propuestas, se buscó el uso de reactivos poco contaminantes. La concentración del ácido ascórbico se determina por la correspondiente disminución de la absorción de radiación del I_3^- en la zona del espectro visible. Se trata de una curva de calibración que no corresponde al procedimiento analítico clásico ya que implica una determinación indirecta de la concentración de un analito mediante la disminución de la concentración de uno de los reactivos a causa de una reacción redox. El tipo de curva que se obtiene y el material y equipo utilizado se muestran en la Figura 1.

Antes de la realización de cada experiencia se analiza el correspondiente diagrama ecológico. El que corresponde a este procedimiento se muestra en los resultados mostrados en la Figura 2. En él puede observarse que los Principios de Química Verde involucrados son: a) prevenir la formación de residuos contaminantes (Principio 1); b) utilizar metodologías que requieran o generen sustancias con toxicidad reducida (Principio 3); evitar el uso de sustancias auxiliares (Principio 5); realizar procesos en condiciones ambientales (Principio 6); minimizar el riesgo de accidentes químicos (Principio 12) (Anastas & Warner, 1998). Los números en los recuadros pequeños corresponden al principio de la Química Verde involucrado; se incluyen también los íconos de seguridad de los reactivos utilizados

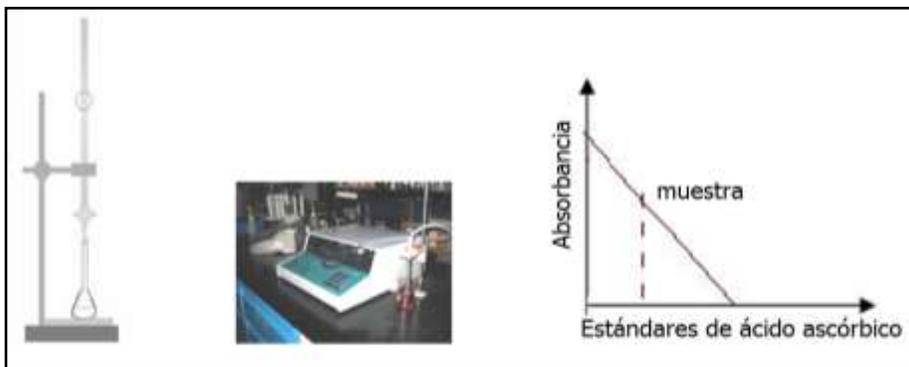


Fig. 1: Material y equipo necesario para obtener la curva de calibración fotométrica indirecta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Esta experiencia práctica ha sido probada en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México durante cuatro semestres con alumnos de la asignatura de Química Analítica Experimental I (aproximadamente 300 estudiantes) y los resultados obtenidos muestran que los alumnos son capaces de diseñar, en forma individual, el procedimiento a seguir de acuerdo al equilibrio redox involucrado, elegir la longitud de onda de medida de la absorbancia, el material y las concentraciones que se requiere utilizar

para el trazo de la curva de calibración considerando la posible concentración del analito en una muestra problema. Los resultados obtenidos han sido repetibles y reproducibles y en el diagrama ecológico se observa gran acercamiento verde.

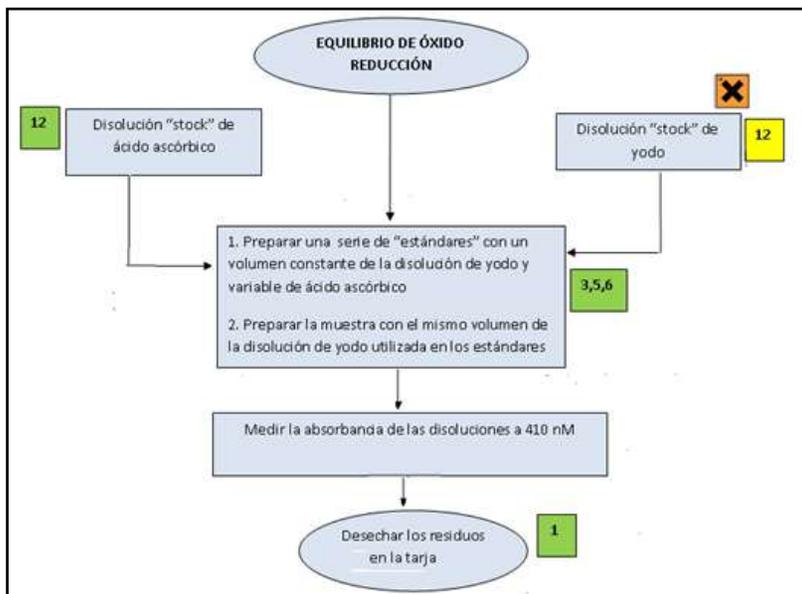


Fig. 2: Diagrama ecológico de la experiencia práctica correspondiente al equilibrio de oxidorreducción.

- Como los resultados deben ser expresados con la incertidumbre y trazabilidad asociadas a la determinación, se requiere que los estudiantes apliquen conocimientos relacionados estos aspectos. Los resultados permiten reflexionar también en la alternativa de disminuir aún más el consumo de reactivos utilizando la muestra de ácido ascórbico como reactivo titulante en una valoración indirecta.
- El diseño de este experimento requiere de conocimientos básicos de razonamiento analítico no convencional y de análisis de las posibles fuentes de incertidumbre involucradas en los resultados de las muestras analizadas.
- La curva de calibración indirecta obtenida utilizando una concentración constante de yodo/yoduro y concentraciones variables de ácido ascórbico ha permitido obtener la pureza de diferentes muestras de ácido ascórbico.

CONCLUSIONES

1. Aunque en sus orígenes la Química Verde fue desarrollada para ser aplicada en síntesis orgánica y sus aplicaciones en este campo resultan obvias, los razonamientos de la Química Analítica, tradicionalmente aplicables al Análisis Químico, pueden ayudar a la implementación de otros procesos químicos, orgánicos o inorgánicos, considerando la filosofía de trabajo planteada por el protocolo de la Química Verde.
2. A pesar de que en la práctica del Análisis Químico se utilizan cantidades pequeñas de reactivos, en ocasiones se hace uso de productos tóxicos y, también en estos casos, es importante buscar métodos alternos de análisis que minimicen o sustituyan el uso de estos reactivos.
3. La capacidad de razonamiento desarrollada en la didáctica de la Química Analítica debe orientarse a fin de que el futuro profesional sea capaz de continuar en la búsqueda del desarrollo de procesos químicos que sean lo más acorde posible con los Principios de la Química Verde y de una Civilización Sostenible.
4. Resolver un problema sin seguir un procedimiento previamente establecido, requiere diseñar y ejecutar el

experimento seleccionando reactivos y utilizando el material y equipo disponibles. La formación propuesta para el estudio de la Química Analítica busca desarrollar en los futuros profesionales habilidades y capacidades que le permitan desarrollar nuevos procedimientos, en micro o macro escala, de acuerdo a los Principios de una Química Sostenible.

REFERENCIAS

1. Anastas, P. & Warner, J. (1998). *Green Chemistry. Theory and Practice*. New York: Oxford University Press.
2. Armenta, S., Garrigues, S. & De la Guardia, M. (2008). Green Analytical Chemistry. *Trends in Analytical Chemistry*, 27(6), 497-511.
3. Braun, B., Charney, R., Clarens, A., Farrugia, J., Kitchens, C., Lisowski, C., *et al.* (2006). Green Chemistry in the Curriculum. *J. Chem. Ed.* 83, (8), 1126-1129.
4. Charlot, G. (1971). *Química Analítica General. Tomo 1*. Barcelona: Toray-Masson, S.A.
5. Dosal, M.A. & Llano, M. (2011). Introducción a la Química Analítica Verde. En R. Miranda *et al.*, *Química Verde Experimental (95-103)*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
6. Eurachem/CITAC Working Group. (2012). CITAC Guide: *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. 3th ed. Ellison, S.L.R. and Williams, L.R. (Eds). Bajado Julio 15, 2013, desde, www.eurachem.org.
7. Harris, D.C. (2005). *Exploring Chemical Analysis*. 3th ed. New York: Freeman and Company.
8. Galuszka, A., Migaszewski, Z. & Namieśnik, J. (2013). The 12 principles of green analytical chemistry and the SIGNIFICANCE mnemonic of green analytical practices. *Trends in Analytical chemistry*, 50, 78-84.
9. García, F. & Dobado, J.A. (2008). Química sostenible: una alternativa creíble. *An. Quím.*, 104(3), 205-210.
10. Ivanova, E.H. & Detcheva, A.K. (2012). Green Analytical chemistry and its perspectives in Bulgaria. *Bulgarian Chemical Communications*, 44(1), 5-10.
11. Kirchhoff, M.M. (2001). Topics on Green Chemistry. *J. Chem. Ed.*, 78(12), 1577.
12. Morales, M.L., Martínez, J.O., Reyes-Sánchez, L.B., Hernández, O.M., Arroyo, G.A., *et al.* (2011) ¿Qué tan verde es un experimento? *Educ. Quím.*, 22(3), 240-248.
13. Namieśnik, J. (2001). Green analytical chemistry-Some remarks. *J. Sep. Sci.*, 24, 151-153.
14. Pence, L.E. & Kirchhoff, M.M. (2013). ConfChem Conference on Educating the Next Generation: Green and Sustainable Chemistry-Green Chemistry and Sustainability through the American Chemical Society Education Division and Committee on Environmental Improvement. *J. Chem. Ed.*, C90, 510-512.
15. Tobiszewski, M., Mechlínska, A. & Namieśnik, J. (2010). Green analytical chemistry—theory and practice. *Chem. Soc. Rev.*, 39, 2869–2878.
16. Trémillon, B. (1997). *An Applied Analytical Approach: Reactions in Solution*. New York: Wiley.
17. Trémillon, B. (1998). Homenaje a Gastón Charlot. (Alberto Rojas trad.). *Educ. Quím.*, 9(2), 67-72. (Obra original publicada en 1995).