



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

XIII JORNADES DE XARXES D'INVESTIGACIÓ EN DOCÈNCIA UNIVERSITÀRIA

**Noves estratègies organitzatives i metodològiques en la formació
universitària per a respondre a la necessitat d'adaptació i canvi**



JORNADAS
DE REDES DE INVESTIGACIÓN
EN DOCENCIA UNIVERSITARIA **XIII**

**Nuevas estrategias organizativas y metodológicas en la formación
universitaria para responder a la necesidad de adaptación y cambio**

ISBN: 978-84-606-8636-1

Coordinadores

María Teresa Tortosa Ybáñez

José Daniel Álvarez Teruel

Neus Pellín Buades

© **Del texto: los autores**

© **De esta edición:**

Universidad de Alicante

Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad

Instituto de Ciencias de la Educación (ICE)

ISBN: 978-84-606-8636-1

Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades

Publicación: Julio 2015

Diseño de Experimentación en Química Inorgánica sostenible

R. Torregrosa Maciá^{*}; M. Molina Sabio; A. Bueno López; A. Berenguer Murcia; M. Martínez Escandell; I. Martínez Mira; O. Cornejo Navarro; E. Vilaplana Ortego.

*Departamento de Química Inorgánica
Universidad de Alicante*

RESUMEN.

Se plantea al alumnado el análisis de la huella de carbono que tiene, en la actualidad, la asignatura práctica Experimentación en Química Inorgánica, con el objetivo de que busquen las posibilidades de sustitución y/o reducción de reactivos tóxicos y peligrosos en las prácticas de laboratorio que se imparten. Previamente, en base a dicho análisis, la red ha redactado las directrices que guiarán al alumno en sus búsquedas en bases de datos y su proposición de sustitución razonada de reactivos. Cada grupo de alumnos que trabaja en un proyecto particular de “Síntesis y caracterización de sustancias inorgánicas”, redacta un protocolo de actuación para eliminar/reducir el uso de reactivos peligrosos/contaminantes en su proyecto. Como colofón, se redacta un protocolo global para hacer más sostenible el proceso de enseñanza/aprendizaje de esta asignatura práctica. Además de trabajar el contenido específico de la asignatura, con esta metodología de aprendizaje, se pretende aumentar la capacidad del alumnado del Grado en Química para ser autónomo a la hora de proponer actuaciones fundamentadas que conduzcan a preservar el medio ambiente en su futuro ejercicio de la profesión de graduado en química.

Palabras clave: diseño de docencia, química verde, gestión sostenible, química inorgánica.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la enorme aceleración en el desarrollo de los procesos químicos de síntesis de nuevos materiales, y el correspondiente deterioro al que se está llegando en el planeta desde la mitad del siglo pasado, muchos gobiernos se han planteado cuestiones de “sostenibilidad” y de un uso de los recursos más amable con el planeta. Ya en 1987, la Comisión Mundial sobre Medioambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas dio la siguiente definición de Sostenibilidad¹: *“Meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”* (Sostenibilidad es “Enfrentarse a las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para enfrentarse a sus propias necesidades”). La *“Química Verde”*² es una disciplina relativamente nueva, cuyo nombre fue acuñado por primera vez en los años 90 por el entonces Director de la EPA (Agencia para la Protección del Medioambiente estadounidense) Dr Paul T. Anastas que fue, posteriormente, Director del Instituto de Química Verde^{e1}, como una evolución natural de las iniciativas para prevenir la polución. Los conceptos de “Sostenibilidad” y “Química Verde” van de la mano y se complementan; no se puede conseguir la Sostenibilidad sin la ayuda de la Química Verde. Entre las profesiones que deben poner en práctica las soluciones a este deterioro se encuentra, sin lugar a dudas, la profesión química, como se afirma en el artículo *“Color Me Green”*³: *“La Química Verde representa los pilares que soportan nuestro futuro sostenible. Es imperativo enseñar los valores de la química verde a los futuros profesionales de la química.”*

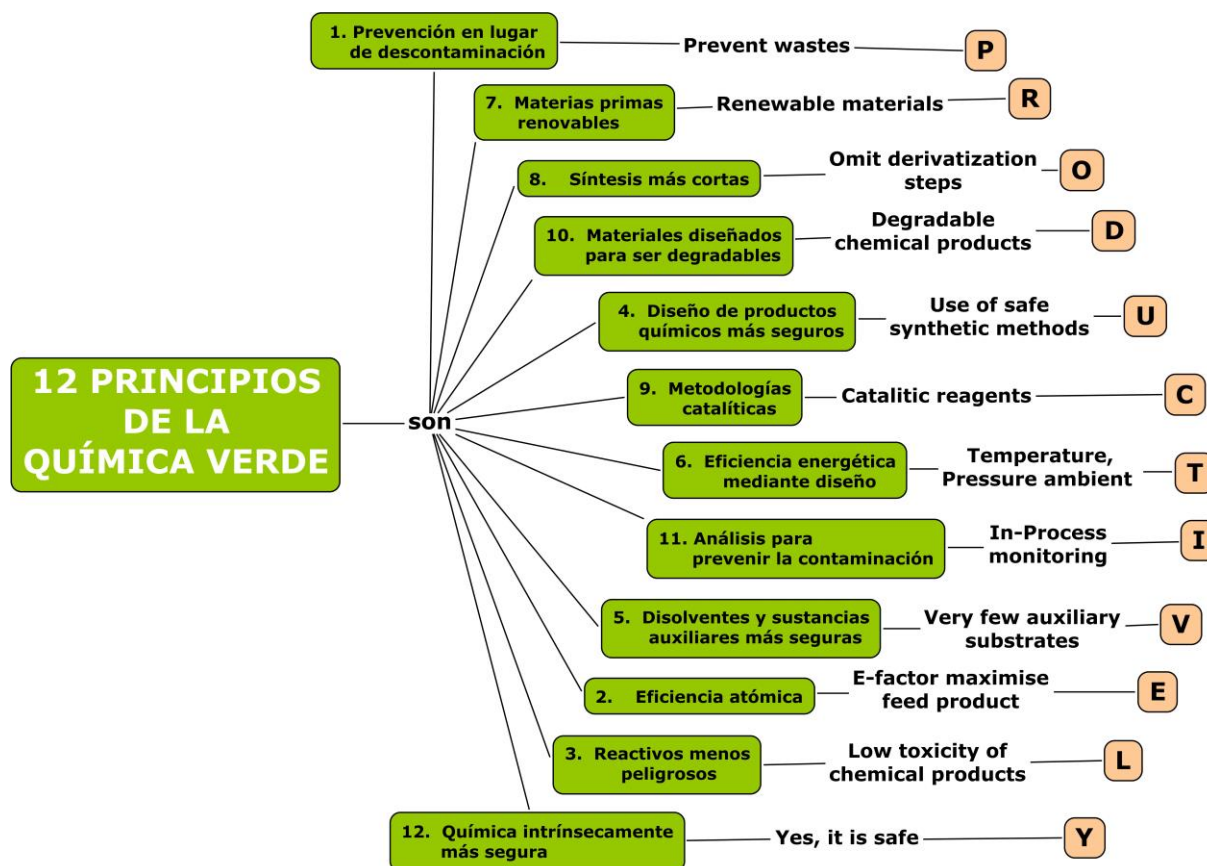
1.1 Diseño de Experimentación Química Inorgánica siguiendo los principios de la Química Verde y Sostenible y su parámetros de cuantificación en el Grado en Química.

Las prácticas de laboratorio del Grado en Química son el terreno más adecuado para que el alumnado tome conciencia y aprenda a trabajar de acuerdo a los principios de la Química Verde² (Figura 1) y la cuantificación de sus parámetros⁴. La asignatura del Departamento de Química Inorgánica “Experimentación en Química Inorgánica”, se ha utilizado para realizar el diseño del aprendizaje de los contenidos educativos del programa, introduciendo el desarrollo de las habilidades necesarias para que, adicionalmente, el alumnado aprenda a utilizar los principios de la Química Verde.

El profesorado y el PAS participante en este trabajo, han analizado las posibles modificaciones sobre las prácticas actuales para elaborar un protocolo de actuación que se

presentará al alumnado como herramienta para el análisis, reflexión y propuesta de cambios para su adecuación a los principios de sostenibilidad y química verde.

Figura 1. Los 12 principios de la Química Verde² y la regla mnemotécnica para recordarlos (en inglés)⁵.



La Química Verde se puede cuantificar según el conjunto de parámetros⁴ definidos para evaluar el nivel de cumplimiento de sus 12 principios², que se describen en las siguientes ecuaciones de la (1) a la (7).

Factor E (medioambiental):

$$E = \frac{\text{Masa total de residuos}}{\text{Masa de producto final}} \quad (1)$$

Intensidad de Masa:

$$IM = \frac{\text{Masa total del proceso}}{\text{Masa de producto}} \quad (3)$$

Productividad de Masa:

$$PM = \frac{\text{Masa total de producto}}{\text{Masa total del proceso}} \quad (5)$$

Rendimiento Másico Efectivo:

$$RME(\%) = \frac{\text{Masa de producto} \times 100}{\text{Masa de reactivos peligrosos}} \quad (7)$$

Eficiencia Atómica:

$$EA(\%) = \frac{\text{Pm de producto} \times 100}{\Sigma \text{Pm de reactivos}} \quad (2)$$

Eficiencia Másica de la Reacción:

$$EMR(\%) = \frac{\text{Masa de prod. (C)} \times 100}{\text{Masa de react. (A)} + \text{Masa de react. (B)}} \quad (4)$$

Eficiencia de Carbono:

$$EC(\%) = \frac{\text{Carbono en producto} \times 100}{\text{Carbono total en reactivos}} \quad (6)$$

Entre los anteriores se seleccionarán los más adecuados para cuantificar la calidad de química verde de las prácticas a analizar.

1.2 Revisión de la bibliografía.

En el informe de la Conferencia del Comité sobre Educación de la Sociedad Americana de Química “*Explorando la Visión Molecular*” (2003)⁶, se analizan las necesidades educativas de los profesionales de la química llegando a un consenso respecto a los contenidos mínimos que necesita el alumnado para ejercer, de forma efectiva, la profesión química. Algunos de los participantes apuntan a la necesidad de enfatizar más en “*la toxicidad de las sustancias químicas y en el papel de los químicos para dar soporte al desarrollo sostenible*”. Y, entre los distintos aspectos pedagógicos de los que carece la educación actual en química, encuentran una falta de “*argumentación acerca de que los problemas, a los que se ha de enfrentar la profesión química en un futuro, serán complejos y desafiantes*”.

Aunque no hay muchos cursos de grado dedicados a la Química verde, según se encuentra en la revisión “*Green chemistry teaching in higher education: a review of effective practices*”⁷ (en nuestro país no existe ningún estudio), en EEUU hay universidades que tienen programas de laboratorio verdes bien establecidos, entre las que se encuentran:

Cornell University^{e2}

University of Wisconsin Green Bay^{e3}

University of British Columbia^{e4}

University of California at Berkeley^{e5}

Harvard University^{e6}

Independientemente de los libros dedicados a la “Química Verde”, en los que se presentan los principios de esta nueva disciplina y las estrategias para adaptar las síntesis de compuestos químicos a los principios de la química verde, existen libros de texto generales como “*Chemistry in context*”⁸, un proyecto de la American Chemical Society, con un enfoque en los principios de la química verde a través de las bases fundamentales de la química, al que acompaña un manual de laboratorio.

En la parcela de la experimentalidad, que es la que nos ocupa en este proyecto, hay diferentes libros en los que se recopilan recetas de prácticas de laboratorio, por ejemplo, a microescala⁹⁻¹², o con experimentos adaptados a los principios de la química verde¹³.

1.3 Propósito.

Por ello, los autores de este trabajo, de acuerdo con C.M. Henry³, consideran que la preparación de los futuros profesionales de la química requiere la utilización de los principios y estrategias de la química verde en la parcela de prácticas de laboratorio del título de Graduado en Química, para cuya consecución se propone el diseño de las directrices a seguir por el alumnado para:

- 1) analizar si las prácticas que tienen que realizar en el laboratorio cumplen con los principios de la química verde y si no,
- 2) buscar, en bases de datos, las posibilidades razonadas de sustitución de reactivos tóxicos y peligrosos.

Además de trabajar el contenido específico de la asignatura, con esta metodología de aprendizaje, se pretende aumentar la capacidad del alumnado del Grado en Química para ser autónomo a la hora de proponer actuaciones fundamentadas que conduzcan a preservar el medio ambiente en su futuro ejercicio de la profesión de graduado en química.

2. DESARROLLO DE LA CUESTIÓN PLANTEADA

2.1 Objetivos.

Adaptar las prácticas de laboratorio de la asignatura “Experimentación en Química Inorgánica” para que el alumnado evalúe si cumplen los Principios de la Química Verde y, en caso de no cumplirlos, busquen las posibilidades de sustitución de reactivos tóxicos y peligrosos, siguiendo las directrices elaboradas por los componentes de la red GEQI.

2.2. Método y proceso de investigación.

En primer lugar, cada grupo de trabajo dentro de la red ha analizado las prácticas actuales para ver en qué grado se cumplen los principios de la química verde.

El trabajo realizado por cada grupo se puede resumir en los siguientes apartados:

2.2.1. Prácticas susceptibles de re-escalado (P).

Se han localizado prácticas de la asignatura que pueden re-escalarse utilizando la misma receta, consiguiendo con ello disminuir el gasto de materias primas y de residuos, a la vez que se disminuye la huella de Carbono, como consecuencia de las disminuciones anteriores y del uso de agua destilada y del de material de laboratorio de menor tamaño, que requiere menor cantidad de vidrio en su fabricación.

Ejemplo de aplicación:

Uno de los principios para el desarrollo de unas prácticas más sostenibles dentro de la asignatura es la búsqueda de estrategias para minimizar el impacto ambiental de cada práctica mediante la racionalización y el escalado de la misma, sin que ello suponga disminución alguna en su eficiencia como práctica de laboratorio o en el aprendizaje tanto de conocimientos como de habilidades por parte del alumnado. La incidencia de esta práctica dentro del contexto de la Química Verde está especialmente centrada en el primer punto incluido en la figura 1. Mediante la minimización de la generación de residuos, a través del escalado en una práctica dada, disminuiríamos el consumo de energía derivado del tratamiento de residuos (Prevención en lugar de descontaminación). La práctica en cuestión plantea al alumnado la separación cromatográfica de distintos iones de Vanadio, con estados de oxidación que van del +2 al +5, usando una columna construida por el propio alumno empleando una bureta, resina de intercambio iónico comercial (que se reutiliza una vez finalizada la práctica) y lana de vidrio. Dentro de las reglas mnemotécnicas descritas en la Figura 1, el nuevo enfoque que se le pretende dar a esta práctica ahonda sobre los aspectos P (Prevenir la generación de residuos), R (Materias primas renovables), T (Temperatura y presión ambientales) y E (Factor “E” o factor medioambiental, que estima la eficiencia global del proceso) de la misma.

El principio fundamental del que parte esta propuesta es el de reducir de forma drástica tanto la cantidad de reactivos necesarios como la de productos generados, mediante un proceso de escalado simple. En la Tabla 1 se recoge de forma esquemática las diferencias fundamentales entre la práctica, tal y como se recoge en el guion de prácticas de la asignatura (Curso académico 2014-2015), y nuestra propuesta de re-escalado.

La metodología planteada en este trabajo nos permite, sin menoscabo alguno del valor docente y de las posibilidades de aprendizaje para el alumnado, reducir de forma drástica (ver Tabla 1):

- La cantidad de reactivos necesarios y de residuos generados (hasta en un orden de magnitud).
- El coste (tanto económico como energético) de la realización de la práctica por alumno.
- El equipamiento necesario para poder realizar la práctica, lo cual permitiría facilitar el transporte de la experiencia para mostrarla al público en días de puertas abiertas o en ferias científicas.

Tabla 1. Comparación entre una práctica de separación cromatográfica convencional y escalada.

	Práctica convencional/por alumno	Práctica escalada/por alumno
Material columna	Bureta de 25 mL	Pipeta Pasteur de vidrio
Reactivos	200 mg de metavanadato amónico	20 mg de metavanadato amónico
Disoluciones	Ácido clorhídrico conc. 50 mL	Ácido clorhídrico conc. 5 mL
Sistema de separación	Resina Amberlite (reutilizable)	Resina Amberlite (reutilizable)
Eluyentes	100-200 mL	10-20 mL
Sistema de detección	Tubos de ensayo (+ gradilla)	Placa de ensayos
Limpieza de material	Bureta, tubos de ensayo (agua y jabón)	Placa de porcelana (lavado agua)
Gestión de residuos/material	Limpieza de todo el material de vidrio	Limpieza sólo placa de ensayos

2.2.2. Prácticas susceptibles de cambio de receta clásica (L)(V)(E)(I).

Entre las prácticas actuales, hay algunas que se pueden adaptar a los principios de la química verde buscando recetas clásicas que presenten un menor factor E (ec. 1) y/o una mayor EA% (ec. 2).

La publicación de la síntesis de un compuesto químico nuevo es el final de un largo recorrido en el que quien investiga ha ido ensayando y seleccionando pacientemente los reactivos, ajustando sus cantidades y buscando las condiciones óptimas para obtener el mejor rendimiento del producto. Por ello, es frecuente encontrar en la bibliografía diversos enfoques, distintas formas de abordar la preparación, diferentes recetas de un compuesto dado.

En esta asignatura, el alumnado ha de sintetizar varios compuestos en el laboratorio. El profesorado solamente proporciona el nombre del compuesto y el primer paso del alumnado es buscar en bibliografía la información existente acerca del método de síntesis. En la mayoría de los casos se encuentran 3-4 recetas y, con la ayuda del profesorado, se tiene que seleccionar una, la que luego se desarrollará en el laboratorio. La selección de la receta es un ejercicio muy instructivo ya que obliga al alumnado a conocer el fundamento en el que se basa la síntesis, la reacción implicada, el papel que juega cada uno de los reactivos, las condiciones experimentales utilizadas, la instrumentación requerida para desarrollarla, etc... Una vez analizadas las distintas recetas, el alumnado tiene que aplicar unos criterios de selección basados en la

disponibilidad de instrumentación y equipamiento, tiempos de ejecución, facilidad del método, etc... y es justamente en esta etapa donde pueden entrar en juego los criterios de selección en los que descansa la Química Verde: menor consumo de reactivos, uso de reactivos alternativos, condiciones de reacción más suaves, menores emisiones de contaminantes, menos residuos, etc...

Ejemplo de aplicación:

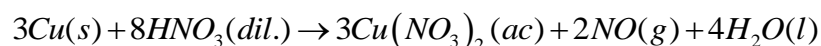
Consigna del profesorado: Preparar 5g de nitrato de Cobre (II), $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ (esta cantidad se corresponde con $5/187,555 = 0,027 \text{ moles} \approx 0,03 \text{ moles}$). Buscar en la bibliografía recetas de síntesis de este compuesto y seleccionar la que consuma menos reactivos y genere menos residuos o gases tóxicos.

El alumnado ha encontrado 3 recetas diferentes en las que las reacciones químicas implicadas son:

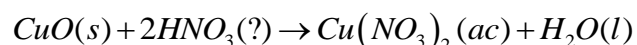
Receta 1. Utiliza cobre metálico y ácido nítrico concentrado desprendiéndose un gas tóxico como en el NO_2 :



Receta 2. Utiliza cobre metálico y ácido nítrico diluido, desprendiéndose un gas tóxico como es el NO :

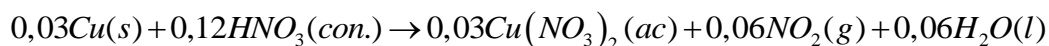


Receta 3: Utiliza óxido de Cobre (II) y ácido nítrico, sin especificar la concentración. No hay emisión de gases:

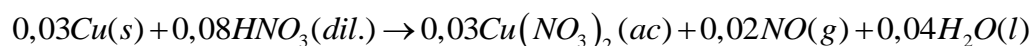


Multiplicando las ecuaciones de las recetas 1 y 3 por 0,03 y la de la receta 2 por 0,01, todas quedan ajustadas a 0,03 moles de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ facilitándose la comparación.

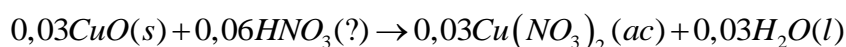
Receta 1:



Receta 2:



Receta 3:



En la Tabla 2 se comparan las cantidades de reactivos requeridas para la preparación solicitada de 5g ($\approx 0,03$ moles) de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, las cantidades de residuos generados y

algunos parámetros de la química verde para razonar la selección de la receta más adecuada.

Tabla 2. Resumen comparado de cantidades de reactivos y productos que intervienen en la preparación de 0,03 moles de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, incluyendo la valoración de algunos parámetros de química verde como el rendimiento másico efectivo (RME), la eficiencia atómica (EA) y el factor medioambiental (factor E).

Receta	HNO_3 moles	NO_2/NO moles	H_2O moles	RME (%)	EA (%)	Factor E
1	0,12	0,06	0,06	74,409	148,20	5,45
2	0,08	0,02	0,04	111,61	148,20	1,185
3	0,06	0,00	0,03	148,818	131,57	0

Analizando los datos contenidos de la Tabla 2, la Receta 1 es la menos adecuada para cumplir con los requisitos de química verde ya que, a pesar de tener una eficiencia atómica (EA, ec.2) igual a la Receta 2 y mayor que la Receta 3, el rendimiento másico efectivo (RME, ec. 8) es el menor de las tres y el factor medioambiental (E, ec. 1) es el más elevado de las tres. Atendiendo al valor de estos dos últimos para la Receta 3, no se dudaría en seleccionar dicha receta por los respectivos valores de RME (el más alto) y el de Factor E (que es 0).

2.2.3 Prácticas susceptibles de utilizar materias primas diferentes, que generen menos residuos y, adicionalmente, escalado. (L) (D)(U)(P).

Algunas de las prácticas actuales pueden realizarse sustituyendo materias primas que se requieren en cantidad mayor que otras que realizan el mismo papel en la receta. Además de este cambio, también se puede re-escalar disminuyendo el tamaño de los materiales de laboratorio necesarios para llevar a cabo la práctica.

Ejemplo de aplicación:

En la práctica actual, en la que se realiza el crecimiento de cristales de ioduro de plomo (II) en gel de sílice, se requiere el uso de material de plástico para evitar el deterioro que produce el silicato sódico en los recipientes de vidrio. Los reactivos utilizados son: una disolución diluida de silicato sódico, una disolución de ácido acético (3 mL de ácido acético glacial sobre 12 mL de agua destilada), 0,4 g de acetato de plomo (II) y una disolución de 1 g de ioduro potásico en 5 mL de agua destilada. Entre los materiales, además de vasos y probeta de plástico, se utiliza un tubo de ensayo de vidrio de 25x250.

Una vez producidos los cristales de yoduro de plomo, estos se separan del gel y el tubo de ensayo utilizado, con el residuo de gel, se deshecha porque su interior está atacado por el silicato sódico y no es reutilizable.

En esta práctica, el gel de sílice se puede sustituir por gel de agar utilizando tubos de ensayo más pequeños. Además, esta preparación no requiere ni ácido acético ni material de plástico. Los tubos de ensayo pueden ser más pequeños y después de sacar el gel de dentro de los mismos y recoger los cristales, el gel se puede desechar en la basura orgánica ya que es biodegradable y el tubo de vidrio se puede reutilizar.

En la Tabla 3 se presenta la comparación de los reactivos las cantidades utilizadas de los mismos, así como el material desechable. De los datos presentados, se evidencia la disminución de las cantidades de reactivos utilizadas en la propuesta alternativa a la práctica convencional, así como la eliminación de reactivos peligrosos para la salud y la disminución de residuos.

Tabla 3. Comparación entre una práctica de cristalización de yoduro de plomo en gel de sílice convencional y en gel de agar escalada.

	Práctica convencional/por alumno	Práctica escalada/por alumno
Recipiente de cristalización	Tubo de ensayo de 25x250	Tubo de ensayo de 15x150
Reactivos	3,125 mL de Silicato sódico 0,479 g de KI 0,583 g Acetato de plomo 2,083 ml Ác. Acético glacial	0,042 g de Agar 0,200 g de KI 0,073 g Acetato de plomo no se requiere Ác. Acético glacial
Limpieza de material	Tubo de ensayo 25x250 no se limpian. Se desechan por estar deteriorado su interior.	Tubo de ensayo 15x150 se lava con agua y jabón
Gestión de residuos/material	Limpieza del resto de material de vidrio Desechado de los tubo de ensayo 25x250	Limpieza de todo el material de vidrio (incluido el tubo de 15x150)

2.2.4. Prácticas que utilicen como materia prima residuos y requieran menor gasto energético (P)(R)(T).

Las preparaciones clásicas de magnetita utilizan métodos que requieren elevada energía, como ocurre generalmente con las reacciones en estado sólido, debido a su elevada energía de activación.

Ejemplo de aplicación:

En este caso, se ha preparado una práctica de obtención de nanopartículas de magnetita a partir de un material de residuo, placas de hierro, cuyos cambios superficiales, provocados por el proceso de corrosión, se han determinado mediante DRX. La transformación de Fe_2O_3 en Fe_3O_4 requiere una elevada energía de activación. Una forma de reducir la temperatura y el tiempo de la reacción de síntesis está basada en el aumento puntual de temperatura que se produce cuando los reactivos se irradian con radiación electromagnética del rango de las microondas.

La reacción de transformación de Fe_2O_3 en Fe_3O_4 requiere la participación de Fe sólido (de la propia lámina) en el proceso que se realiza en fase sólida que, en este caso, está presente junto al óxido de hierro superficial procedente de la corrosión. A pesar de que las reacciones en estado sólido requieren elevadas temperaturas y tiempos, para permitir la difusión de las especies desde el interior de los sólidos reactivos hacia la interfase, la aplicación de energía electromagnética del rango de las microondas produce elevaciones puntuales de temperatura de nivel mucho mayor que el alcanzado en un horno convencional, por lo que se produce de forma muy rápida la reacción.

Es muy importante el ahorro de energía que se obtiene al utilizar las microondas durante un periodo de tiempo de 30 min respecto al tratamiento de elevada temperatura durante días.

2.2.4. Evaluación del ahorro de materiales, reactivos y residuos de estas prácticas.

Para alguno de estos casos, se ha calculado el posible ahorro en los materiales y reactivos utilizados y en los residuos generados, que se incluyen en los Anexos 1 y 2.

3. CONCLUSIONES

En base al análisis de los datos obtenidos de la investigación, se han encontrado varias posibilidades de actuación:

- 1- Las prácticas que se realizan a escala normal, se pueden re-escalar usando cantidades mucho menores de reactivos, obteniéndose menor cantidad de residuos.
- 2- Proponer como criterios de selección la mayor eficiencia atómica (EA%) junto con el menor uso de reactivos peligrosos (menor factor E) de una receta.
- 3- Sustitución de reactivos que generan una gran cantidad de residuos, y re-escalado.
- 4- Aprovechamiento de residuos como materia prima para síntesis de compuestos y métodos de síntesis que requieren poco gasto energético.

- 5- Adicionalmente, se reduce la huella de Carbono (el gasto energético requerido para la obtención de los reactivos, su transporte, el tratamiento del agua destilada, el tratamiento de los residuos) al reducirse los costes tanto en reactivos, como material de laboratorio y de tratamiento de residuos (ver Anexos 1 y 2):
- El consumo de agua destilada se reduce considerablemente, al tener que preparar disoluciones de volúmenes inferiores.
 - La limpieza del material, en cuanto al consumo de agua corriente no es valorable ni parece significativa.
 - En cuanto al ahorro energético, las cantidades a calentar son inferiores, necesitando menos tiempo para alcanzar las temperaturas requeridas en cada caso, lo que redundará en un menor consumo energético.
 - La utilización de Agar produce un ahorro de tiempo en la consecución de la práctica, ya que tarda menos en gelificar que el silicato sódico.
- 6- Como consecuencia de las conclusiones anteriores, las directrices que recibirá el alumnado, tras asistir a la explicación de los principios de la Química verde y el uso de los parámetros para su cuantificación, serán:
- Analizar, desde la perspectiva de Q.V. y sus parámetros (Figura 1 y ecuaciones de la 1 a la 7), la receta adjudicada para detectar cuáles pueden ser los principios a los que se adapta y/o cuáles son los más problemáticos para la sostenibilidad a los que no se adapta.
 - Utilizar diferentes bases de datos para encontrar sustancias que puedan sustituir a aquellas peligrosas.
 - Realizar propuestas razonadas de mejora en la receta para que se eliminen, al menos, las materias primas más problemáticas a los que no se adapta.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo “Nuestro futuro común” (1987). Recuperado de http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/42/427&Lang=S
- Anastas, P.T. & Warner, J.C. (1998). *Green Chemistry: Theory & Practice*. New York: Oxford Univ. Press.
- Henry, C. M. (2000). Color Me Green. *Chem. Eng. News*, 78 (28), 49-55.

4. Constable, Alan D., Curzons, A.D. and Cunningham, V.L. (2002). *Green Chemistry*, 4, 521–527.
5. Tang, S. L. Y. Smith, R. L. and Poliakoff, (2005). *M. Green Chem.*, 7, 761.
6. American Chemical Society. Committee on Education. *Exploring the Molecular Vision*. Conference Report (2003). Recuperado de <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/about/governance/committees/education/exploring-the-molecular-vision.pdf>
7. Andraos, J. and Dicks, A. P. (2012). Green chemistry teaching in higher education: a review of effective practices, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 13, 69-79.
8. American Chemical Society (ACS). (2014). *Chemistry in Context: Applying Chemistry to Society*. 8th Edition. McGraw-Hill Higher Education.
9. Jennifer, L. Y., and Robert P. (2013). ConfChem Conference on Educating the Next Generation: Green and Sustainable Chemistry & Education Resources from the ACS Green Chemistry Institute. *J. Chem. Educ.*, 90, 513–514.
10. Lerner, L. (2011). *“Small-Scale Synthesis of Laboratory Reagents”*. Boca Raton. CRC Press.
11. Szafran, S., Pike, R. M., Singh, M. M. (1991). *“Microscale Inorganic Chemistry. A Comprehensive Laboratory Experience”*. N.Y. John Wiley & Sons, Inc.
12. Bishop, C. B., Bishop, M.B., Whitten, K.W. (2004). Fifth ed. Toronto. Thomson. Books/Cole.
13. Arnaiz, F. J. (2014). *“Experimentos para el Laboratorio de Química Inorgánica Verde. Versión para América”*. Lulu.

«Fuentes electrónicas»

- e1. ACS Chemistry for Life. Green Chemistry Institute. Green Chemistry. What is Green Chemistry? <http://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry.html>
- e2. University of Cornell. Sustainable campus. <http://www.sustainablecampus.cornell.edu/initiatives/green-your-lab>
- e3. University of Wisconsin Green Bay. <http://www.uwgb.edu/safety/safpolicies/chemicalhygiene/>
- e4. University of British Columbia. Green laboratories program. <http://riskmanagement.ubc.ca/environment/green-labs-program/green-your-lab>

e5. University of California at Berkeley.

<http://bcgc.berkeley.edu/chem1a>

e6. Harvard University. Green LABs.

<http://green.harvard.edu/programs/green-labs>

e7. Calculadora de la huella de carbono

<http://www.ccalc.org.uk/ccalc2.php>

e8. Green Chemistry Educational Network.

<http://cmetim.ning.com/>

e9. Substitution Support Portal.

<http://www.subsport.eu/?lang=es> <http://www.subsport.eu/substitution-steps?lang=e>

e10.

ANEXO 1

Costes Práctica - Separación de oxocomplejos de Vanadio por cromatografía de intercambio iónico.

Material y costes para la práctica actual.

Material/puesto	Cantidad	Coste (Eur)	Peso (g)
Bureta 25 mL	1	40.98	55.47
Tubo ensayo 15 x 150	12	1.92	183.72
Pinzas	2	21.32	
Nueces	2	10.26	
Soporte	1	35.72	
Matraz Erlenmeyer 100 mL	3	11.4	50.19
Gradilla	1	13.2	
Vaso precipitados 100 mL	2	7.82	53.8
Pinza Madera	1	0.83	
Embudo recto	1	9.22	35.41
Probeta 25 mL*	1	8.29	49.86
Probeta 250 mL*	1	14.15	203.6
Matraz Aforado de 100 mL*	1	13.83	56
Matraz Aforado de 1000 mL*	1	17.74	230
Espátula	1	7.85	
Mechero Bunsen	1	40.37	
TOTAL		254.9	918.05

Coste de reciclar el vidrio en caso de rotura de todo el material por cada puesto: **0.26 Euros**

Reactivos:

Reactivos envases	Precio		Proveedor	Cantidad (g o mL)	Consumo/puesto (g o mL)	Gasto (Euros)	Reutilizable
	Precio (Euros)	(por g o mL)					
Lana de vidrio 100g	26.81	0.27	Panreac	0.10	0.100	0.027	No
Resina Amberlite (1Kg)	59.3	0.06	Sigma-Aldrich	50.00	50.000	2.965	Sí
HCl 37% (1L)	26.27	0.03	Fisher	100.00	100.000	2.627	No
NH ₄ VO ₃ (250G)	155.72	0.62	Panreac	0.40	0.400	0.249	No
Zn Polvo (250G)	17.4	0.07	Sigma-Aldrich	0.30	0.300	0.021	No
Algodón hidrófilo 100g	0.95	0.01	Farmacia	10.00	0.010	1.000	No
TOTAL	286.45	1.06	TOTAL (g)	60.80	50.81	6.889	
			TOTAL (mL)	100.00	100.00		

Coste Total por puesto: **261.79 Euros** (sin tener en cuenta roturas de material de vidrio).

Coste Total por grupo (suponiendo un grupo de 6 puestos): **1570.74 Euros**

Material y costes tras aplicar el escalado.

Material tras escalado/puesto	Cantidad	Coste (Eur)	Peso (g)
Pipeta Pasteur rama larga	1	0.09	3.07
Tubo ensayo 15 x 150	1	0.16	183.72
Pinzas	1	10.66	
Nueces	1	5.13	
Soporte	1	35.72	
Matraz Erlenmeyer 25mL*	1	5.98	27.54
Gradilla	1	13.2	
Vaso precipitados 25 mL	1	3.91	19.10
Pinza Madera	1	0.83	
Placa ensayos	1	2.36	
Probeta 10 mL*	1	7.37	32.32
Probeta 25 mL*	1	8.29	49.86
Probeta 250 mL	1	14.15	203.6
Matraz Aforado 25 mL*	1	14.17	27.54
Matraz Aforado de 100 mL*	1	13.83	56
Matraz Aforado de 1000 mL	1	17.74	230
Cuentagotas plástico	2	0.14	
Espátula	1	7.85	
Mechero Bunsen*	1	40.37	
Tetina	1	0.14	
TOTAL		202.09	832.75

Coste de reciclar el vidrio en caso de rotura de todo el material por cada puesto: **0.23 Euros.**

Reactivos:

Reactivos envases	Precio (Euros)	Precio (por g o mL)	Proveedor	Cantidad (g o mL)	Consumo/puesto (g o mL)	Gasto (Euros)	Reutilizable
Lana de vidrio 100g	26.81	0.27	Panreac	0.00	0.000	0.000	No
Resina Amberlite (1Kg)	59.3	0.06	Sigma-Aldrich	1.00	1.000	0.059	No
HCl 37% (1L)	26.27	0.03	Fisher	10.00	10.000	0.263	No
NH ₄ VO ₃ (250G)	155.72	0.62	Panreac	0.40	0.080	0.050	No*
Zn Polvo (250G)	17.4	0.07	Sigma-Aldrich	0.30	0.060	0.004	No*
Algodón hidrófilo	0.95	0.01	Farmacia	10.00	0.010	1.000	No
TOTAL	286.45	1.06	TOTAL (g)	11.70	1.15	1.376	
			TOTAL (mL)	10.00	10.00		

Coste Total por grupo (suponiendo un grupo de 6 puestos): 1222.08 Euros.

En ambos casos no se tiene en cuenta la compra inicial de los reactivos. Se parte de la base de que los reactivos ya se tienen. En ambos casos, el coste inicial de la compra de reactivos es de 285.46 Euros.

ANEXO 2

Costes Práctica - Síntesis de PbI_2 . Técnicas de cristalización.**Material y costes para la práctica actual.**

Material/puesto	Cantidad	Coste* (Eur)	Peso (g)
Espátula	1	7.85	
Vidrio de reloj de 70 mm diámetro	2	6.88	52.32
Vaso 50 mL	2	5.24	73.00
Pipeta graduada 10 mL	1	1.32	
Pro-pipeta 10 mL	1	4.96	23.36
Placa Agitadora-calefactora	1	239.4	
Cristalizador 150 mm diámetro	1	7.38	300
Probeta 10 mL plástico	1	0.79	
Vaso precipitados 100 mL plástico	1	0.66	
Tubo ensayo 25x250	1	1.75	62.29
Gradilla	1	13.69	
Pinza metálica para tubo ensayo	1	0.86	
Cuentagotas plástico	1	0.07	
Matraz Erlenmeyer 250 mL	1	4.03	107.26
TOTAL		294.88	618.23

Coste de reciclar el vidrio en caso de rotura de todo el material por cada puesto: **0.17 Euros**

Reactivos:

Reactivos envases	Precio* (Euros)	Precio (por g o mL)	Proveedor	Cantidad (g o mL)	Consumo/puesto (g o mL)	Gasto (Euros)	Reutilizable
KI (250G)	95.86	0.383	Panreac	1.150	1.150	0.441	No
$Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ (1 KG)	51.75	0.052	Panreac	0.700	0.700	0.036	No
CH_3COOH glacial (1L)	24.61	0.025	Panreac	5.000	5.000	0.123	No
Silicato sódico	23.53	0.024	Panreac	7.500	7.500	0.176	No
TOTAL	195.75	0.460	TOTAL (g)	1.850	1.850	0.777	
			TOTAL (mL)	12.500	12.500		

Coste Total por puesto: **295.66 Euros** (sin tener en cuenta roturas de material de vidrio).

Coste Total por grupo (suponiendo un grupo de 6 puestos): **1773.94 Euros**.

No se tiene en cuenta la compra inicial de los reactivos. Se parte de la base de que los reactivos ya se tienen. En ambos casos, el coste inicial de la compra de reactivos es de **195.75 Euros**.

Material y costes tras aplicar el escalado.

Material tras escalado/puesto	Cantidad	Coste* (Eur)	Peso (g)
Espátula	1	7.85	
Vidrio de reloj de 70 mm diametro	2	6.88	52.32
Vaso 25 mL	2	7.82	38.20
Pipeta graduada 5 mL	1	1.16	20.82
Pro-pipeta 5 mL	1	4.96	
Placa Agitadora-calefactora	1	239.4	
Cristalizador 150 mm diametro	1	7.38	300
Tubo ensayo 15 x 150	1	0.16	15.31
Gradilla	1	13.2	
Pinza de madera para tubo ensayo	1	0.83	
Cuentagotas plástico	1	0.07	
TOTAL		289.71	426.65

Reactivos:

Reactivos envases	Precio* (Euros)	Precio (por g o mL)	Proveedor	Cantidad (g o mL)	Consumo/puesto (g o mL)	Gasto (Euros)	Reutilizable
KI (250G)	95.86	0.383	Panreac	0.483	0.483	0.185	No
Pb(CH ₃ COO) ₂ ·3H ₂ O(1 KG)	51.75	0.052	Panreac	0.175	0.175	0.009	No
Agar (0.500 KG)	106.23	0.212	Panreac	0.100	0.100	0.021	No
TOTAL	253.84	0.435	TOTAL (g)	0.758	0.758	0.216	
			TOTAL (mL)	0.000	0.000		

Coste Total por puesto: **290.05 Euros** (sin tener en cuenta roturas de material de vidrio).

Coste Total por grupo (suponiendo un grupo de 6 puestos): **1740.29 Euros**.

En 2015 han hecho estas prácticas 48 alumnos/as, lo que supone 24 puestos de trabajo. En términos económicos los costes parciales y totales, junto con el ahorro debido a la aplicación de los cambios propuestos sería el siguiente:

Práctica	Nº Puestos	Coste por puesto (Euros)	Coste total 2015 (Euros)	Coste por puesto tras modificación (Euros)	Coste Total tras modificación (Euros)	Ahorro Total por año (Euros)
Separación de oxocomplejos de Vanadio por cromatografía de intercambio iónico.	24	261.79	6282.96	203.46	4883.04	1399.92
Síntesis de PbI₂. Técnicas de cristalización.	24	295.66	7095.84	290.05	6961.2	134.64

*Para conocer los precios, tanto de material de laboratorio como de reactivos, se ha realizado un barrido de diferentes casas comerciales, lo que nos llevado a elegir los precios medios de distintos fabricantes.

Las empresas y distribuidores consultados han sido:

1. www.labbox.com
2. <https://es.fishersci.com/es>
3. <http://www.grupo-selecta.com>
4. <http://www.panreac.es/>
5. <http://www.sigmaaldrich.com/spain>