

# El compromiso de enseñar química con criterios de sostenibilidad: la química verde

**El compromís d'ensenyar química amb criteris de sostenibilitat: la química verda**  
**The challenge of teaching chemistry using sustainable criteria: green chemistry**

**M. Luz González, Angel Valea** / Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente.  
Universidad del País Vasco UPV/EUITI de Bilbao



## resumen

Los beneficios que aporta la química a la sociedad son muchos, sin embargo no goza de gran aceptación popular. La enseñanza de la química orientada a criterios de sostenibilidad podría mejorar su aceptación social y su interés. La química verde ha ido avanzando en las áreas de investigación y desarrollo. Su punto clave es que sin usar ni producir sustancias peligrosas, el riesgo es nulo y no es necesario el tratamiento de residuos. La mayoría de los procesos de síntesis desarrollados con criterios de sostenibilidad son demasiado complejos para la enseñanza no universitaria. Sin embargo, puede ser viable la introducción de conceptos asequibles a través la presentación de casos.

## palabras clave

Sostenibilidad, química verde, prevención de la contaminación, economía atómica, biocatalizadores

## resum

Els beneficis que aporta la química a la societat són nombrosos, tot i així no té gaire acceptació popular. L'ensenyament de la química orientada a criteris de sostenibilitat podria millorar la seva acceptació social i el seu interès. La química verda ha anat avançant en les àrees de recerca i desenvolupament. El seu punt clau és que sense utilitzar ni produir substàncies perilloses el risc és nul i no es necessari el tractament de residus. La major part dels processos de síntesi desenvolupats amb criteris de sostenibilitat són massa complexos per a l'ensenyament no universitari. Tanmateix, pot ser viable la introducció de conceptes assequibles mitjançant la presentació de casos.

## paraules clau

Sostenibilitat, química verda, prevenció de la contaminació, economia atòmica, biocatalitzadors

## abstract

The benefits of chemistry to society are great however people have a low awareness of it. Teaching chemistry using sustainable criteria could improve its social acceptance and interest. Green Chemistry plays an increasing role in research and development. The key point is that if we don't produce or use dangerous substances, there is no risk, and there is no treatment and disposal of these substances. Many of the synthesis processes developed as part of green chemistry are too complicated to be taught outside of university. However it is possible to introduce the more accessible concepts through the presentation of case studies.

## key words

Sustainability, green chemistry, prevention of contamination, economizing at the atomic level, biocatalysts

## Introducción

La química ha aportado tantos beneficios a la sociedad que resulta imposible concebir el mundo actual sin ellos. Basta pensar, por ejemplo, en los nuevos materiales, los medicamentos, la cosmética, los productos alimentarios y fitosanitarios, así como su influencia en términos de economía y bienestar, ya que se ha convertido en un sector que emplea a una parte considerable de la población activa.

A finales de la década de 1960 y principios de la siguiente, comenzó a darse importancia al medio ambiente, tal como demuestra la creación de la Agencia de Protección Medioambiental (EPA) y la celebración del Primer Día de la Tierra. Desde entonces, se han aprobado más de cien leyes dirigidas a controlar el riesgo y prevenir la exposición a productos tóxicos y peligrosos. Aunque en su mayoría se han revelado muy útiles, todavía queda mucho por hacer en lo que se refiere al control de la exposición a sustancias peligrosas.

En la década de 1990 la EPA cambió de estrategia: en lugar de ocuparse del tratamiento y la solución de problemas concretos, se centraría en su prevención. Con ese nuevo giro, se buscarían métodos más flexibles y económicamente viables no sólo por lo que respecta a las regulaciones ya existentes, sino también a la hora de evitar la contaminación desde su origen. En 1991 la química verde se convirtió en un objeto formal. De acuerdo con sus postulados, la química verde o tecnología sostenible se ocupa del diseño de productos o procesos químicos que reducen o eliminan el uso y producción de sustancias peligrosas. Así, en vez de limitar el riesgo mediante el control en la exposición de productos químicos peligrosos, la química verde intenta reducir e

incluso eliminar la peligrosidad. El punto clave reside en el hecho de que, si no usamos ni producimos sustancias peligrosas, el riesgo es nulo y no habrá que preocuparse del tratamiento de dichas sustancias.

En cuanto a la tecnología sostenible, se define como la tecnología necesaria para cubrir necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para conseguir sus propios intereses.



■ **"Los químicos tenemos como responsabilidad profesional servir al interés público, al bienestar y al avance del conocimiento científico, preocuparse de la salud y el bienestar de sus compañeros, consumidores y la comunidad, comprender y anticiparse a las consecuencias medioambientales de su trabajo, evitar la polución y de proteger el medioambiente".**

*Código de conducta de los químicos según la American Chemistry Society*

Podría decirse que tales esfuerzos persiguen un fin, la sostenibilidad, para el cual la química es el medio. Los doce principios de la química verde para valorar la sostenibilidad de un proceso han sido desarrollados por Anastas y Warner (1991) y son los siguientes:

1. Es preferible evitar la producción de un residuo que tratar de limpiarlo una vez que se haya formado.

2. Los métodos de síntesis deberán diseñarse de manera que incorporen al máximo, en el producto final, todos los materiales usados durante el proceso.

3. Siempre que sea posible, los métodos de síntesis deberán diseñarse para utilizar y generar sustancias que tengan poca o ninguna toxicidad, tanto para el hombre como para el medio ambiente.

**La tecnología sostenible se define como la tecnología necesaria para cubrir necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para conseguir sus propios intereses**

4. Los productos químicos deberán ser diseñados de manera que mantengan su eficacia a la vez que reduzcan su toxicidad.

5. Se evitará, en lo posible, el uso de sustancias auxiliares (disolventes, reactivos de separación, etc.) y en el caso de que se utilicen deberán ser lo más inocuas posible.

6. Los requerimientos energéticos serán catalogados por su impacto medioambiental y económico, reduciéndose todo lo posible. Se intentará llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura y presión ambientes.

7. La materia prima ha de ser preferiblemente renovable en vez de agotable, siempre que sea técnica y económicamente viable.

8. Se evitará en lo posible la formación de derivados (grupos de bloqueo, de protección/despro-

tección, modificación temporal de procesos físicos/químicos).

9. Se emplearán catalizadores (lo más selectivos posible) en vez de reactivos estequiométricos.

10. Los productos químicos se diseñarán de tal manera que al finalizar su función no persistan en el medio ambiente sino que se transformen en productos de degradación inocuos.

11. Las metodologías analíticas serán desarrolladas posteriormente para permitir una monitorización y control en tiempo real del proceso, previo a la formación de sustancias peligrosas.

12. Se elegirán las sustancias empleadas en los procesos químicos de forma que se minimice el potencial de accidentes químicos, incluidas las emanaciones, explosiones e incendios.

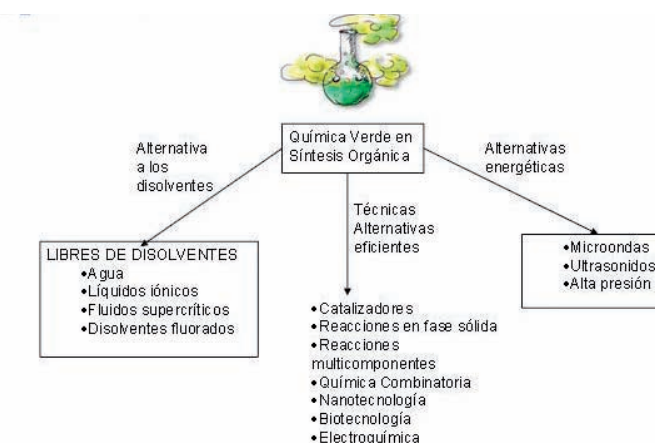
Para definir la sostenibilidad de un proceso se utiliza el concepto de *economía atómica*, para lo cual suelen utilizarse una serie de factores como:

- El factor E: definido como la cantidad de residuo producido por el proceso químico, en todo proceso se persigue un factor  $E \rightarrow 0$

- Eficacia atómica (EMY)
- Rendimiento de masa efectivo (MI)

- La productividad de masa (1/MI)

Los ejemplos de la tecnología y química verde que han sido desarrollados, abarca la mayoría de las áreas de la química incluidas la orgánica, bioquímica, inorgánica, polímeros, toxicológica, medioambiental, industrial, etc. La química verde cumple con todos los requisitos que exige el punto de vista científico, resulta más segura que los procesos convencionales, es de menor coste y, sobre todo, es compatible con un desarrollo sostenible. Sin embargo, muy poco de la misma ha sido incluida en los planes de estudios. El Proyecto de desarrollo de materia educativa en química



### La química verde en la síntesis orgánica

verde (EPA/ACS Green Chemistry Educational Materials Development Project) de la EPA/ACS se planteó como finalidad el desarrollo de materiales que ayuden a incluir la química verde en los planes de estudios.

Aún no se dispone de muchos procesos de síntesis desarrollados según los criterios de sostenibilidad establecidos y los que existen pueden resultar demasiado complejos para introducirlos en la enseñanza no universitaria. Sin embargo, pueden introducirse algunos conceptos como el de "economía atómica" para medir la eficiencia de una reacción química,

que complementa el concepto tradicional de medirla en función del rendimiento de una reacción (moles productos/moles de reactante limitante).

Como ejemplo a comentar podríamos presentar el caso del ibuprofeno, uno de los analgésicos de amplia utilización junto con la aspirina. La síntesis tradicional del ibuprofeno fue desarrollada y patentada por Boots Company of England en la década de 1960. Se trata de un proceso que consta de seis etapas cuyo balance atómico se presenta en la tabla 1:

Reactantes	Forman parte del ibuprofeno	Sobran (residuos)
$C_{10}H_{14}$	$C_{10}H_{13}$	H
$C_4H_6O_3$	$C_2H_3$	$C_2H_3O_3$
$C_4H_7ClO_2$	CH	$C_3H_6ClO_2$
$C_2H_5ON_2$		$C_2H_5ON_2$
$H_3O$		$H_3O$
$NH_3O$		$NH_3O$
$H_4O_2$	$HO_2$	$H_3$
$C_{20}H_{42}NO_{10}ClNa$	$C_{13}H_{18}O_2$	$C_7H_{24}NO_8ClNa$
Masa = 514,5	Masa = 206	Masa = 308,5

$$\% \text{ economía de átomos} = \frac{206}{514,5} \times 100 = 40\%$$

Tabla 1: Balance de átomos que intervienen en la síntesis del ibuprofeno en el proceso tradicional en seis etapas.

Ante el costo energético y de materias primas que supone esta síntesis en seis etapas, la complejidad de los procesos de separación del ibuprofeno de los residuos del proceso así como el costo adicional del reciclado o la gestión de los residuos, la BHC Company ha desarrollado una nueva síntesis del ibuprofeno que ocurre en solamente tres etapas. En este proceso la mayoría de los átomos que constituyen los reactivos forman parte del ibuprofeno, lo que minimiza la cantidad de residuos lo que supone una mayor economía de átomos respecto al proceso tradicional, como puede verse en la tabla 2.

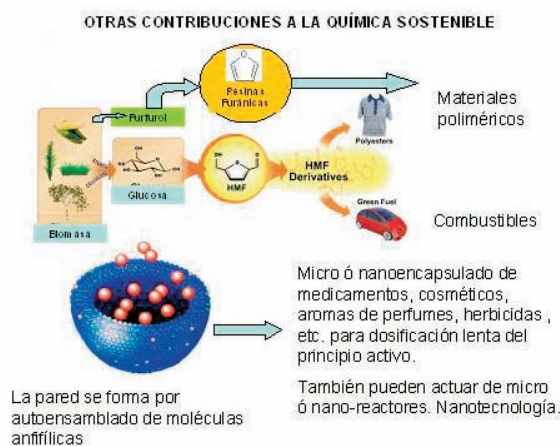
Este concepto de economía de átomos es sencillo de utilizar y sobre todo es fácil relacionarlo por un lado con el ahorro de materias primas y por otro con el hecho de que la reducción de residuos elimina la producción de posibles contaminantes y su gestión, ya no hay que eliminarlos, simplemente no producirlos.

Otro aspecto fácil de comprender y que puede relacionarse con lo cotidiano es el hecho de disminuir la cantidad de reactivos en base a sustituirlos por otros más eficientes y seguros por ejemplo los utilizados en detergentes y otros productos de limpieza, la elaboración de piezas de material plástico con diseños adecuado (botellas de agua y refrescos cada vez más ligeros y delgados) en aras a utilizar la menos cantidad de material posible sin perder las propiedades. Medicamentos más efectivos que suministrados en micro ó nanocapsulas poliméricas, que permiten su liberación controlada dentro del organismo, consiguen minimizar la cantidad de medicamento a suministrar a los pacientes, con lo que se minimizan también los efectos secundarios. Supramoléculas y dendritas sintetizadas en base a autoensamblado de moléculas, como

Reactantes	Forman parte del ibuprofeno	Sobran (residuos)
$C_{10}H_{14}$	$C_{10}H_{13}$	H
$C_4H_6O_3$	$C_2H_3O$	$C_2H_3O_2$
$H_2$	$H_2$	
CO	CO	
$C_{15}H_{22}O_4$	$C_{13}H_{18}O_2$	$C_2H_4O_2$
Masa = 266	Masa = 206	Masa = 60

$$\% \text{ economía de átomos} = \frac{206}{266} \times 100 = 77\%$$

Tabla2: Balance de átomos que intervienen en la síntesis del ibuprofeno en el proceso de química sostenible.



Otras contribuciones a la química sostenible: micro i nano encapsulado y autoensamblado.

### Siendo la propia naturaleza el modelo a imitar se genera una nueva tendencia que se conoce como biomimetismo, en la que se utilizan los denominados biocatalizadores

si de una construcción se tratase, etc.

Las reacciones químicas que ocurren en la naturaleza normalmente implican la actuación de enzimas que son catalizadores muy específicos, se desarrollan a temperaturas bajas y se producen pocos residuos. Siendo la propia naturaleza el modelo a imitar se genera una nueva tendencia que se conoce como biomimetismo, en la que se utilizan los denominados biocatalizadores.

Pero la pregunta en este caso es ¿pueden utilizarse los biocatalizadores en medios de reacción mucho más agresivos que los que ocurren en los seres vivos?, por ejemplo en disolventes orgánicos, pH extremos, temperaturas elevadas, etc.

En la actualidad, se conoce que los disolventes orgánicos pueden sustituirse por los llamados *disolventes neutrópicos* entre los cuales se encuentran los *fluidos supercríticos* y los *líquidos iónicos*. Estos disolventes permiten desarrollar



procesos limpios, evitan medios de reacción tóxicos, se recuperan fácilmente, pueden reutilizarse y permiten la actuación de los biocatalizadores sin que se desnaturalicen. La principal desventaja es que el equipo necesario para producirlos es costoso.

### Los educadores necesitan las herramientas apropiadas, entrenamientos y materiales para integrar la química verde en la enseñanza y en la investigación

Ante el desafío de la educación de las nuevas generaciones parece evidente la necesidad de que a los estudiantes de todos los niveles se les debe educar en la filosofía y la práctica de la química sostenible. En este sentido, los planes de estudio deberían incluir:

- La consideración del riesgo y la toxicidad como una propiedad fisicoquímica de la estructura molecular que puede ser diseñada y modificada
- La introducción de toxicología química y del riesgo.
- La sustitución del concepto de rendimiento por el de economía atómica.
- El desarrollo de experimentos de laboratorio, adecuados al nivel educativo del estudiante, para ilustrar los principios de la química verde.
- La presentación y el comentario de casos reales desarrollados por diferentes laboratorios o equipos de investigación.

Los educadores, por otro lado, necesitan las herramientas apropiadas, entrenamientos y materiales para integrar la química verde en la enseñanza y en la investigación. Algunos de los casos de tecnología/química verde que se encuentran publica-

dos en internet y, por lo tanto, de fácil acceso son los siguientes:

- El concepto de la economía del átomo (*concept of atom economy*) de Barry Trost, que se centra en los átomos utilizados y sobrantes en una reacción.
- Una nueva síntesis del Ibuprofeno (*synthesis of ibuprofen*) que presenta el mejor historial en cuanto a la economía del átomo y la prevención de la contaminación.
- El uso del dióxido de carbono residual como agente propelente para espuma de poliestireno (*waste carbon dioxide as a blowing agent*) y que, a diferencia de los CFC, no causan disminución de la capa de ozono.
- El desarrollo de dispersantes para el dióxido de carbono (*surfactants for carbon dioxide*) que permite usar el CO<sub>2</sub> como disolvente (por ejemplo, en la limpieza en seco).
- El desarrollo del peróxido de hidrógeno como activador de la oxidación (*oxidant activators for hydrogen peroxide*). Ello permite, por ejemplo, sustituir los blanqueadores clorados, que afectan a la capa de ozono, por el peróxido de hidrógeno en la industria del papel.
- El desarrollo de nuevos insecticidas (*new insecticides*) que sean más específicos para los organismos a los que se dirigen.

En este momento existe ya una amplia bibliografía publicada en torno a la química verde y adaptada a diferentes niveles educativos. Asimismo, en los últimos años las universidades han ampliado la oferta de formación de postgrado sobre química sostenible.

#### Bibliografía

- GONZÁLEZ, M.L., VALEA, A. (2007) Libro de Resúmenes y CD del Congreso "Jornadas Nacionales sobre la Enseñanza de la Química." del ANQUE .Murcia
- IBORRA PASTOR, J.L (2007) Lección Inaugural curso 2007-08.

Universidad de Murcia.  
Facultad de Química

MESTRES QUADRENY, R. (2006) 6<sup>th</sup> ANQUE International Congress of Chemistry "Chemistry and Sustainable Development" Puerto de la Cruz (Tenerife).



**María Luz González Arce**

es catedrática de Ingeniería Química, licenciada en ciencias y Doctora en Ingeniería Química. Su dedicación y formación está vinculada a aspectos relacionados con la innovación docente y en los últimos años se ha centrado en las nuevas estrategias que implica el sistema de enseñanza y evaluación por competencias. Trabaja en el campo de la investigación con criterios de sostenibilidad, en concreto en el desarrollo de materiales termorreguladores y (nano)composites a partir de materias primas renovables.



**Angel Valea** es doctor en Química Física por la Universidad del País Vasco y es catedrático del Departamento de Ingeniería Química y del Medio de dicha universidad. Es coordinador de la selectividad en el País Vasco y su trayectoria profesional está muy vinculada a la innovación docente en el ámbito de la enseñanza-aprendizaje en el área de las Ingenierías. Posee amplia experiencia en el desarrollo de Proyectos de I+D+i en el campo de los materiales plásticos y (nano)composites.