

Una orientación de la química para el siglo XXI

Química sostenible

La química está presente en todo lo que nos rodea y que nos facilita la vida. Muchos de los compuestos y materiales que intervienen en nuestra vida han sido preparados a través de procesos químicos industriales, aunque durante décadas se diseñaron sin tener en cuenta su repercusión en el entorno. Debemos asumir el reto de que estos productos puedan ser preparados a través de procesos no contaminantes. El término *Green Chemistry* (química sostenible), nacido en 1998, alude al esfuerzo de los químicos para desarrollar procesos y productos que prevengan la contaminación y que sean seguros para los seres humanos y el medio ambiente.

Por **ANTONIO DE LA HOZ AYUSO**. Doctor en Ciencias Químicas, catedrático de Química Orgánica. antonio.hoz@uclm.es. **ÁNGEL DÍAZ ORTIZ**. Doctor en Ciencias Químicas, profesor titular de Química Orgánica. angel.diaz@uclm.es.
Facultad de Química. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real.





IMPORTANCIA DE LA QUÍMICA

La química está presente en cada una de nuestras actividades diarias y en todos y cada uno de los objetos que nos rodean. De modo cotidiano, la química está en contacto con cada uno de nosotros, es una ciencia que nos ayuda a alimentarnos, a vestirnos, a desplazarnos, a sanar enfermedades, a alojarnos e incluso nos entretiene (los CD's, las cintas de música o vídeo están fabricadas con productos químicos). La química participa de un modo directo e inevitable en cada una de las etapas de obtención de un determinado producto o material, desde su diseño inicial hasta su adquisición por el consumidor. La química es una ciencia relativamente reciente que, de un modo estructurado, comenzó en Europa hace 200 años y que atrajo a gente como Avogadro, Lavoisier, Faraday y Liebig. Desde entonces se ha convertido en una ciencia que abarca desde el mundo microscópico de los átomos y moléculas hasta el mundo macroscópico de los materiales.

La química es una ciencia central que crea sus propios objetivos. Algunos materiales como los plásticos, que han cambiado el rostro del mundo en el siglo XX y lo seguirán cambiando en el siglo XXI, no existían antes de que un químico los preparara por primera vez.

La industria química es actualmente la industria que mayor valor añadido genera en Europa, zona que ostenta el liderazgo mundial, pues seis de las diez primeras compañías químicas del mundo son europeas. Según los datos de la CEFIC (Asociación Europea de Industrias Químicas) y de la propia UE (Eurostat), las ventas de productos quími-

cos de las compañías europeas se sitúan prácticamente en los 600 billones de euros, superando claramente a las ventas de Estados Unidos (algo más de 400 billones de euros) y de Asia (algo más de 500 billones). La industria química en Europa contribuye con más de 30 billones de euros a la balanza comercial de la Unión Europea. En la actualidad, la contribución de la industria química al Producto Interior Bruto de la UE es prácticamente idéntica a la contribución de la agricultura (alrededor del 2,5% del PIB). Por otro lado, es el sector que mayor porcentaje de sus beneficios invierte en I+D+i. Así, la industria de la química fina invierte alrededor de un 5%, y las compañías farmacéuticas alrededor de un 22%.

La industria química europea consta de unas 30.000 compañías, de las que el 98% son pequeñas y medianas empresas, que emplean a menos de 500 personas. En conjunto, la industria química europea emplea directamente a 1,65 millones de personas, generando el triple de puestos de trabajo indirectos.

La repercusión de la química en la vida cotidiana del ciudadano europeo es muy grande. Como señalamos antes, mirando a nuestro alrededor nos damos cuenta de que muchos de los compuestos y materiales que intervienen en nuestra vida han sido preparados a través de procesos industriales en los que interviene la química. Durante décadas estos procesos se han realizado sin tener en cuenta su repercusión en el medio ambiente, siendo en muchos casos muy contaminantes.

Casi todas las reacciones químicas necesitan un catalizador que aumente su velocidad de reacción para hacerla rentable, pero en general los catalizadores químicos son tóxicos, y una vez concluida la reacción hay que someterlos a diversos tratamientos para evitar la contaminación que producen al ser eliminados. Por otro lado, las reacciones químicas

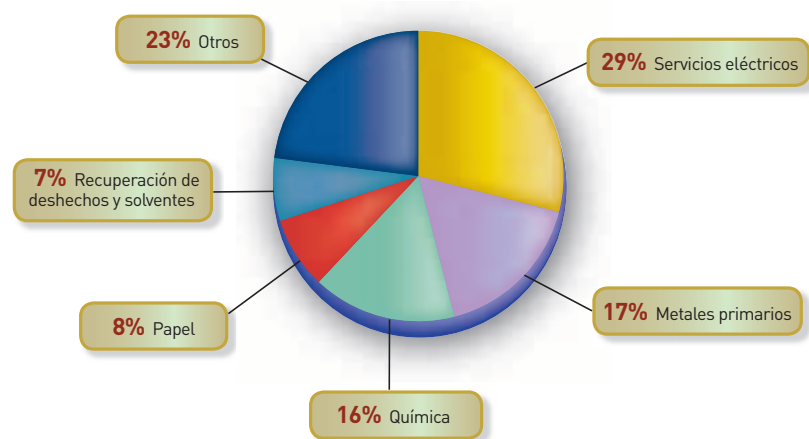
La química es una ciencia que nos ayuda a alimentarnos, a vestirnos, a desplazarnos, a sanar enfermedades, a alojarnos e, incluso, nos entretiene

requieren generalmente el empleo de altas temperaturas y esto supone un gasto de energía que no favorece al medio ambiente y que dificulta la sostenibilidad global de tales procesos. Estos datos nos sugieren que es vital cambiar nuestra filosofía de trabajo, pues los beneficios de la química no pueden alcanzarse a expensas del medio ambiente. Ahora tenemos que asumir el desafío de que estos productos que hacen nuestra

Cuadro 1. Los 12 principios de la química sostenible

1. Es mejor prevenir la formación de residuos que limpiarlos una vez formados. (Prevención).
2. Los métodos sintéticos deben diseñarse para maximizar la incorporación en el producto final de todos los materiales usados en el proceso. (Economía atómica).
3. Siempre que sea posible, deben diseñarse metodologías sintéticas que usen y generen sustancias que no sean tóxicas para la salud y el medio ambiente. (Métodos de síntesis menos peligrosos).
4. Los productos químicos deben diseñarse para mantener la eficacia de su función, pero reduciendo la toxicidad. (Diseño de productos más seguros).
5. El uso de sustancias auxiliares (por ejemplo, disolventes, agentes de separación, etc...) debería ser innecesario en la medida de lo posible e inocuo cuando sean necesarios. (Disolventes y auxiliares más seguros).
6. Los requerimientos energéticos deben ser tenidos en cuenta debido a su impacto medioambiental y económico, y deben ser minimizados. Los métodos sintéticos deben realizarse a temperatura ambiente cuando sea posible. (Eficacia energética).
7. Las materias primas deben ser renovables cuando sea posible técnica y económicamente. (Uso de materias primas renovables).
8. Debe evitarse el uso y generación de derivados (grupos bloqueantes, protección/desprotección, modificación temporal de las condiciones físicas/químicas) cuando sea posible. (Reducir el uso de derivados).
9. Los reactivos catalíticos (tan selectivos como sea posible) son mejores que los reactivos estequiométricos. (Catálisis).
10. Los productos químicos deben diseñarse de manera que su función no persista en el medio ambiente y degradarse a productos inocuos. (Diseño para la degradación).
11. Es necesario desarrollar metodologías analíticas para permitir el análisis a tiempo real, monitorización interna y control previo a la formación de sustancias peligrosas. (Análisis a tiempo real).
12. Deben escogerse las sustancias y la forma de una sustancia utilizada en un proceso químico de manera que se minimice el potencial de accidentes químicos, incluyendo escapes, explosiones e incendios. (Síntesis químicas más seguras).

Figura 1. Origen de la contaminación en Estados Unidos en el año 2001.



vida más cómoda puedan ser preparados a través de procedimientos no contaminantes, siguiendo los principios de la química sostenible (*Green Chemistry*, según la terminología utilizada más ampliamente en el ámbito anglosajón).

INTRODUCCIÓN A LA QUÍMICA SOSTENIBLE

La química sostenible (*Green Chemistry*) es el diseño de productos químicos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias nocivas. El término *Green Chemistry* fue introducido por Anastas (Anastas, 1998) y describe los esfuerzos de los químicos para desarrollar procesos y productos que prevengan la contaminación y que sean seguros tanto para los seres humanos como para el medio ambiente.

Otras definiciones apropiadas para la química sostenible son:

- La química sostenible es el uso de principios químicos y metodologías para reducción de las fuentes. Incorpora la prevención de la contaminación en la manufactura de productos químicos, y promueve la prevención de la contaminación y la ecología industrial (Anastas y Warner).

Debemos asumir el desafío de que los productos que hacen nuestra vida más cómoda puedan ser preparados a través de procedimientos no contaminantes, siguiendo los principios de la química sostenible (Green Chemistry)

- La química sostenible utiliza materias primas (preferentemente renovables), elimina los residuos y evita el uso de reactivos tóxicos y nocivos y disolventes en la manufactura y aplicación de productos químicos (Sheldon).

La química sostenible está, por tanto, directamente relacionada con la sostenibilidad. La consecución de la sostenibilidad se logrará con nuevas tecnologías que provean a la sociedad los productos de los que dependemos, de una manera medioambientalmente responsable.

El diseño de productos medioambientalmente benignos se guía por los doce principios de la química sostenible enunciados por Anastas y Warner (Cuadro 1).

DESARROLLO HISTÓRICO

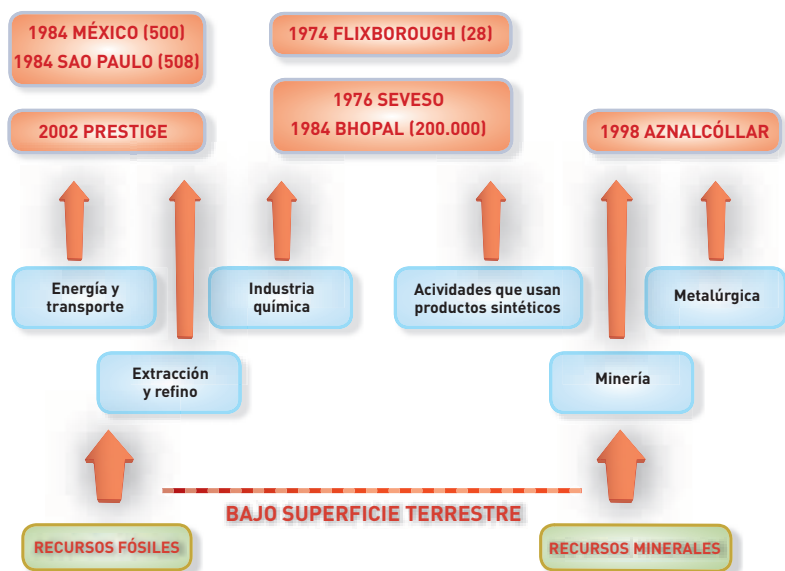
Es cierto que la mayoría de la contaminación no proviene de industrias químicas (Figura 1). Sin embargo, en muchos de los accidentes están implicados productos químicos en cualquier etapa de la producción o transporte (Figura 2), y la mayoría de las fuentes de contaminación son productos químicos.

Muchos agentes contaminantes son sintéticos y se vierten al medio ambiente de manera continua por las industrias químicas; pérdidas de fluidos, materiales residuales se vierten a los medios acuosos naturales. Una proporción importante de los productos químicos diseminados en el medio ambiente se vierte no por la industria química, sino por otras actividades que los utilizan: agricultura, industria textil, construcción, automóvil, limpieza, farmacéutica, etc...

En diciembre del año 1984 se produjo el peor accidente de la historia: una emisión incontrolada de gas de la planta de pesticidas de Union Carbide en Bhopal (India). El gas inundó las calles de la ciudad matando a cientos de miles de personas (Figura 3). Esa noche espantosa y sus terribles consecuencias marcaron la imagen pública de la industria química como una amenaza para la salud y el medio ambiente. También ayudó a concienciar a la industria de la necesidad de cambiar esa percepción e introdujo una nueva imagen de marca, el Cuidado Responsable (*Responsible Care*).

En Estados Unidos, la *Pollution Prevention Act* (Acta de prevención de la contaminación) de 1990 estableció la reducción de los vertidos como la mayor prioridad para resolver los problemas medioambientales. A raíz de esta acta se produce un movimiento desde la idea de «control» de los problemas medioambientales hacia la «prevención» como la estrategia más efectiva, es decir, un enfoque basado en prevenir la formación de residuos desde el origen.

Figura 2. Incidencias graves relacionadas con sustancias químicas. Entre paréntesis figura el número de afectados.



Por otra parte, el número de leyes medioambientales, especialmente las relacionadas con el tratamiento y manejo de residuos, ha aumentado exponencialmente, lo que hace que los costes de producción hayan crecido de forma notable. En Europa, la nueva normativa REACH entró en vigor en junio de 2007 y pretende la regulación de los productos químicos y su uso de manera segura. Tiene en cuenta el registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas.

En 1991, la Oficina de prevención de la contaminación de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de Estados Unidos lanzó la primera iniciativa del *Green Chemistry Program* (programa de química sostenible), la investigación sobre métodos sintéticos alternativos. Desde entonces, en Estados Unidos el *Green Chemistry Program*, junto con los *Presidential Green Chemistry Challenge Awards* y el congreso anual *Green Chemistry and Engineering Conference*, ha servido como punto focal de las actividades y la difusión de la química sostenible.

En la segunda mitad de los años 90 se crearon en todo el mundo institutos y centros encargados de difundir, investigar y enseñar sobre química sostenible

A partir de la segunda mitad de los años 90, en todo el mundo se crearon institutos y centros encargados de la difusión, la investigación y la docencia de la química sostenible. En Estados Unidos, el Green Chemistry Institute; en el Reino Unido, la Green Chemistry Network, que agrupa una larga serie de universidades e instituciones; en Italia, el INCA, un consorcio interuniversitario; en Australia, el Centre for Green Chemistry de la Monash University; en Japón, el Green and Sustainable Network (GSCN). En Europa se creó la plataforma tecnológica de química sostenible SusChem, que intenta agrupar organizaciones e individuos relacionados e interesados en la química sostenible. En España nació la plataforma PETEQU, actualmente SusChem-España. Finalmente, en noviembre de 2002 se creó la Red Española de Química Sostenible como una agrupación de investigadores de universidades y centros de investigación con el objetivo de promover e incrementar en el futuro el desarrollo de la química sostenible.

Los primeros libros, artículos científicos y congresos sobre química sostenible se publicaron en los años 90. Finalmente, en 1999, nació la revista *Green*



Figura 3. Efectos de la tragedia de Bhopal (India).

Chemistry, patrocinada por la Royal Society of Chemistry. Su índice de impacto ha aumentado espectacularmente en estos 10 años de vida, hasta un 4,192, por encima de la mayoría de las revistas de química. En 2008 se han creado dos nuevas revistas especializadas en el tema, *ChemSusChem* y *Green Chemistry Reviews and Letters*, publicadas por Wiley y Taylor & Francis, respectivamente.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y ACTUACIÓN

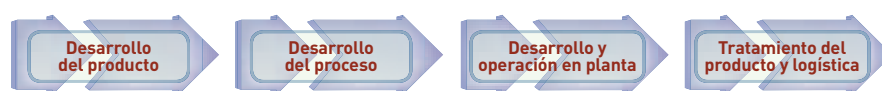
La química sostenible no puede considerarse como una nueva especialidad dentro de la química, sino como un conjunto de principios para abordar el desarrollo sostenible previniendo la contaminación desde el origen. En este sentido, es una materia multidisciplinar que implica a las distintas especialidades de la química, bioquímica, ingeniería química, toxicología y legislación.

Por otra parte, aborda todo el proceso de elaboración de un producto químico, desde las materias primas, diseño e investigación, producción, consumo y reciclado o eliminación (Figura 4).

La escasez de materias primas, combustibles fósiles que son actualmente la base de la química, plantea un reto de futuro. Aunque la cantidad de reservas y su duración es objeto de amplias discusiones, es reconocido el aumento de los precios que seguirá en el futuro. Esto nos lleva al empleo de materias primas renovables y, por tanto, al diseño de tecnologías para su aprovechamiento, es decir, el diseño de procesos para la extracción de los productos de las materias primas y para su transformación en productos de utilidad industrial.

Es necesario tener en cuenta también el impacto que puede tener el desarrollo masivo de una determinada materia prima renovable en el conjunto de la sociedad, como, por ejemplo, el desarrollo masivo de los biocombustibles, que puede

Figura 4. Proceso de elaboración de un producto químico.



La química sostenible es el diseño de productos químicos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias nocivas

producir problemas de deforestación en algunos países o de aumento del precio de productos agrarios en otros.

En relación a las líneas de investigación, el informe de SusChem sobre «Diseño de procesos y reacciones» marca siete líneas prioritarias (SusChem, 2005).

■ Nuevos conceptos sintéticos

Con el objetivo de reducir el número de etapas, mayor eficacia energética, menor consumo de materias primas, utilización de materias primas renovables y evitando la formación de subproductos y residuos.

■ Transformaciones catalíticas

Los procesos químicos deben realizarse con un costo bajo y de una manera ecoeficiente. La catálisis produce contribuciones clave en la producción limpia de combustibles, el uso racional de materias primas, energías sostenibles (pilas de combustible, uso de energía solar) y protección medioambiental (purificación de aire y agua, reutilización de residuos, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y recuperación de agua y suelo).

■ Procesos biotecnológicos

Por ejemplo, la combinación de métodos de ingeniería genética y técnicas analíticas de alta eficacia para acelerar la

biocatálisis y el desarrollo de nuevos procesos más económicos y que permitan complementar o reemplazar los existentes o incluso producir nuevos productos.

■ Intensificación de procesos

Con el objetivo de reducir el número de etapas de un proceso así como utilizar nuevas rutas más eco-eficientes que permitan una mayor producción con equipos más baratos, menor consumo de energía, pequeñas cantidades (o incluso eliminación) de disolventes, menores riesgos, menor impacto medioambiental y mayor selectividad con conversiones de reactivos similares o mayores.

■ Técnicas *in-silico*

El rápido desarrollo de la computación, la tecnología de detección y el control de procesos debe llevar al desarrollo de nuevos materiales catalíticos y/o multifuncionales, con mejor eficacia operacional en procesos industriales, y debe permitir el desarrollo de procesos flexibles adecuados a la producción de un amplio rango de productos en una única unidad.

■ Purificación y formulación

Procesos producidos en plantas con emisiones cero que produzcan productos más puros. Esto aliviaría el impacto de la industria química y los productos en el medio ambiente y la salud. Las tecnologías innovadoras deben permitir la purificación de cantidades sustanciales de productos de manera barata, reduciendo por tanto el consumo de energía y materiales al menos un 25%, y la producción de residuos al menos un 20% menor que las actuales tecnologías.

■ Control de planta

Con el objetivo de llegar al paradigma de producción y negocio. Orientación hacia una producción basada en el conocimiento y, consecuentemente, aumentando de forma considerable la eficacia y flexibilidad de la industria química europea. El control avanzado de planta, la monitorización de la ejecución y la manipulación de la cadena de suministro deben llevar a unas plantas de producción flexibles y seguras con una respuesta óptima a las demandas del mercado.

Sería muy largo enumerar todas las acciones de investigación en que se desarrollan estas líneas prioritarias y, por otra parte, quedaría fuera del objetivo de este artículo. Sin embargo, sí quería destacar algunas de ellas (Anastas, 2002).

■ Polímeros

Los polímeros han sido los materiales que más han transformado nuestras vidas en el siglo XX y seguirán siendo muy importantes en el siglo XXI. Su producción y eliminación presenta riesgos medioambientales que deben ser considerados y remediados. La investigación en materias primas renovables y en biotransformaciones, diseño estructural y diseño para la biodegradabilidad son áreas muy prometedoras. Por ejemplo, se han empleado como materias primas, dióxido de carbono, soja, maíz, glucosa, etc...

■ Disolventes

El diseño de disolventes medioambientalmente benignos y sistemas sin disolvente son áreas de gran interés cuya investigación se está desarrollando notablemente en los últimos años. Los disolventes orgánicos se utilizan en grandes cantidades en la síntesis, separación y purificación de productos químicos. La gran mayoría de ellos se consideran compuestos orgánicos volátiles (VOCs) o polucionantes peligrosos (HAPs), y son inflamables, tóxicos o carcinogénicos.



El uso de fluidos supercríticos como el dióxido de carbono ha tenido gran éxito en la investigación y la industria. El dióxido de carbono presenta numerosas ventajas, no es tóxico, no es inflamable y es barato, y puede separarse del producto por despresurización. Su temperatura y presión crítica es muy accesible ($T_c = 31.1^\circ\text{C}$, $P_c = 74 \text{ bar}$).

El agua es el disolvente benigno por naturaleza. Actualmente, un gran número de reacciones orgánicas llevadas a cabo en disolventes orgánicos pueden realizarse en agua. El agua se ha utilizado a unas temperaturas inferiores a 100°C para aprovechar su efecto hidrofóbico, mientras que se ha empleado a temperaturas cercanas a su punto crítico ($T_c = 374^\circ\text{C}$) como disolvente pseudoorgánico y con fines degradativos.

A 300°C , la constante dieléctrica del

agua ($\epsilon' = 20$) es similar a la que presenta la acetona a temperatura ambiente, por lo que se convierte en un disolvente pseudoorgánico. Por otra parte, el valor del producto iónico del agua pasa de 10^{-14} a 20°C a 10^{-10} a 300°C , por lo que se convierte en un ácido y base fuerte y puede utilizarse como tal, evitando el empleo de ácidos y bases minerales altamente contaminantes.

Los líquidos iónicos representan un área de investigación muy atractiva. Son disolventes muy polares que pueden dar lugar a reacciones nuevas no conocidas previamente. Pueden diseñarse específicamente para variar sus propiedades o como disolventes funcionales que participen en la reacción. Su característica medioambiental principal es que tienen una presión de vapor despreciable, es decir, no son volátiles. El principal inconveniente



Illustration Stock

es que su toxicidad no es conocida y debe ser tenida en cuenta.

Los disolventes fluorados son sistemas particularmente atractivos. A temperatura elevada son miscibles con disolventes orgánicos, pero a temperatura ambiente son inmiscibles con agua y disolventes orgánicos. De esta manera, pueden realizarse reacciones bi- o trifásicas donde el producto permanezca en una fase y el catalizador en otra. Así se elimina la necesidad de separaciones (cromatográficas, destilaciones, ...) que son costosas, tanto por el empleo de disolventes como por el consumo energético.

■ Catálisis

La catálisis se considera el «pilar fundacional» de la química sostenible. Las reacciones catalíticas reducen el consumo de energía, disminuyen las necesida-

La economía atómica se recoge en el principio nº 2 de la química sostenible: «Los métodos sintéticos deben definirse para maximizar la incorporación en el producto final de todos los materiales usados en el proceso»

des de separación como consecuencia del aumento en los rendimientos y la selectividad. Por otra parte, reducen las cantidades de reactivos y permiten el uso de materias primas renovables. Finalmente, la catálisis permite el uso de reactivos menos tóxicos, por ejemplo, la posibilidad de utilizar peróxido de hidrógeno como agente oxidante en lugar de oxidantes minerales altamente tóxicos.

■ Biocatálisis

La biocatálisis es otra de las áreas más desarrolladas, y también de mayor futuro. La posibilidad de utilización de enzimas en disolventes orgánicos, y por tanto de catalizar reacciones orgánicas, abrió un campo muy novedoso que se ha desarrollado notablemente a nivel de investigación y de producción. El empleo de microorganismos, levaduras, anticuerpos monoclonales, células, organismos modificados genéticamente, sistemas recombinantes, así como la posibilidad de utilización de biocatálisis en condiciones extremas, por ejemplo a presión, son áreas de gran importancia en química sostenible.

■ Metodologías sintéticas más eficaces

Últimamente se están desarrollando tanto en la universidad como en la industria nuevas metodologías sintéticas más benignas y con mayor economía atómica. Estos nuevos métodos deben eliminar residuos, mejorar la seguridad y aumentar el rendimiento en la síntesis de productos químicos.

Un aspecto importante es la economía atómica, que fue definida por Trost en 1991 y está recogida en el principio nº 2 de la química sostenible, que afirma: «Los métodos sintéticos deben definirse para maximizar la incorporación en el producto final de todos los materiales utilizados en el proceso».

En el diseño de síntesis orgánica en los últimos 100 años el criterio más importante ha sido el rendimiento de la reacción para «conseguir el producto a cualquier precio». Toda mejora en una secuencia sintética se ha medido en términos de incremento en el rendimiento de la síntesis. Sin embargo, debe realizarse un análisis completo de la eficacia de una síntesis. Si comparamos una reacción con un rendimiento del 75% que produzca pocos residuos y una nueva reacción que mejore significativamente el



Figura 6. Algunos equipos microondas para aplicación en química.

a menudo no puede reproducirse por calefacción clásica (Figura 6). El efecto de la radiación microondas en reacciones químicas es una combinación de efectos térmicos, por ejemplo, sobrecalentamiento, puntos calientes y calefacción selectiva, y de efectos no térmicos del campo altamente polarizante. Así, es posible obtener resultados no accesibles mediante calefacción convencional y/o modificaciones en la selectividad (químico-, regio- y estereoselectividad) de una reacción. Estamos especialmente interesados en estas posibilidades que potencian la utilidad de esta metodología como una alternativa a la calefacción convencional. Muchos resultados de nuestro grupo muestran modificaciones en la selectividad bajo irradiación microondas. Hemos publicado algunas revisiones sobre estas modificaciones y sobre efectos microondas térmicos y no térmicos, y también hemos desarrollado un modelo predictivo.

Nuestra metodología se basa también en el uso de condiciones «sin disolvente», catálisis heterogénea y líquidos iónicos como catalizadores y susceptores. La combinación de metodologías emergentes en síntesis orgánica conduce al diseño de nuevas plataformas tecnológicas para llevar a cabo transformaciones en una etapa o multietapa.

Las condiciones «sin disolvente» son es-

El grupo «Microondas en síntesis orgánica y química verde» investiga desde 1993 la aplicación de metodologías medioambientalmente benignas en síntesis orgánica, el uso de la radiación microondas y su sinergia con reacciones «sin disolvente»

pecialmente adecuadas para manifestar los efectos microondas, ya que la radiación se absorbe directamente por los reactivos y no por el disolvente, lo que potencia el efecto de la radiación.

La catálisis heterogénea se ha aplicado con éxito en química asistida por microondas. Los efectos térmicos pueden ser muy importantes en estas condiciones, ya que un catalizador polar puede calentarse selectivamente; si los reactivos y/o productos son térmicamente inestables, la metodología *cooling while heating* permite evitar su descomposición en la disolución, que está a menor temperatura que el catalizador. Esta situación es casi imposible de conseguir en condiciones clásicas.

Los líquidos iónicos absorben la radiación microondas muy eficientemente y

se han utilizado para sobrecalentar disolventes no polares con microondas. Por ejemplo, la adición de una mínima cantidad de un líquido iónico a una solución de hexano permite calentar este disolvente apolar a 215°C en 10 segundos. Esta situación es muy difícil de conseguir mediante calefacción convencional.

EDUCACIÓN

La mayoría de los libros de texto de química orgánica no utilizan los conceptos de la química sostenible. Por ejemplo, la economía atómica no se trata como un componente necesario para comprender las reacciones. Sin embargo, las próximas generaciones de científicos deben ser entrenados en las metodologías, las técnicas y los principios generales de la química sostenible.

Varias sociedades químicas han asumido el reto y lideran los proyectos educativos en este campo con el desarrollo de libros de texto (Lancaster, 2003), casos estudiados, experimentos de laboratorio (Proyecto NOP, Leadbeater, 2007), cursos de verano, herramientas docentes y de laboratorio, simposios educativos, etc...

En los últimos años se han desarrollado los primeros programas de grado de química sostenible y los primeros máster en química sostenible, especialmente en el Reino Unido.

En España, en el año 2002 se creó la Red Española de Química Sostenible (REDS) como una unión de investigadores de varias universidades y centros de investigación, con los siguientes objetivos:

- Promover el conocimiento, la educación y la investigación en química verde, así como su uso y aplicación industrial.
- Potenciar la cooperación entre sus miembros, el impulso de iniciativas comunes, el intercambio de experiencias y conocimientos para el desarrollo, difusión y aplicación industrial de la química verde.

Cuadro 2. Cursos impartidos en doctorado y máster en química sostenible

Doctorado en química sostenible (Green Chemistry)

- Conceptos básicos en química sostenible.
- Materias primas renovables.
- Aplicaciones industriales.
- Química en agua y disolvente benignos.
- Reacciones sin disolvente. Microondas.
- Fluidos supercríticos.
- Polímeros orgánicos.
- Pilas de combustible poliméricas.
- Catálisis ácido-base.
- Catálisis y oxidantes benignos.
- Catálisis enantioselectiva.
- Catálisis enzimática.
- Biotransformaciones industriales.
- Microorganismos en biotransformaciones.
- Fotoquímica y electroquímica.
- Electroquímica y química verde.
- Ultrasonidos.

Máster en química sostenible (60 créditos)

Mención de calidad de la ANECA desde el curso 2006-2007 al 2007-2008

- Conceptos básicos de química sostenible.
- Aplicaciones industriales de la química sostenible.
- Materias primas renovables.
- Energías sostenibles.
- Catálisis homogénea.
- Catálisis heterogénea.
- Biocatálisis.
- Biotransformaciones industriales.
- Disolventes benignos.
- Fotoquímica y electroquímica ambiental.
- Catálisis inmovilizada.
- Reacciones activadas por medios no convencionales.
- Fluidos supercríticos. Aplicaciones.
- Trabajo fin de máster.

- Fomentar la relación con otras organizaciones e instituciones científicas, así como departamentos, agencias y administraciones gubernamentales.
- Presentar proyectos cooperativos de investigación a los diferentes programas públicos de ámbito estatal, europeo e internacional.
- Diseminar la capacidad de investigación e innovación de sus miembros hacia la comunidad científica mediante la participación y organización de conferencias, cursos, jornadas y escuelas de verano.
- Promover la transferencia de tecnología mediante reuniones entre centros de I+D y empresas (*brokerage events*). Desde entonces se han establecido varios proyectos conjuntos de investigación; la REQS participa activamente en la plataforma SusChem España. También se ha encargado de la difusión de la química sostenible a través de la Jornadas de Química Verde.

La Red Española de Química Sostenible nace en 2002 como una unión de investigadores cuyos objetivos son promover el conocimiento, la educación y la investigación en química verde, así como su uso y aplicación industrial

En cuanto a la docencia, se han organizado cursos de verano en la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP) y en la Universidad Internacional de Andalucía.

Finalmente, la Red organiza el programa de doctorado interuniversitario en química sostenible, que ha obtenido la mención de calidad de la ANECA entre los cursos 2003-04 a 2007-08, siendo uno de los primeros programas de doctorado en con-

seguir la mención de calidad. Como una evolución del programa de doctorado, la Red organiza el máster en química sostenible, que ha obtenido la mención de calidad en los cursos 2006-07 y 2007-08.

Los objetivos docentes que se persiguen con los programas de postgrado en química sostenible son los siguientes:

- Definir la química sostenible y dar una visión de los progresos históricos que han dado lugar al desarrollo de la misma y de otros descubrimientos asociados.
- Establecer los principios de la química sostenible y definir su implementación en la práctica de los procesos químicos industriales.
- Definir las herramientas y las áreas generales de trabajo de la química sostenible. Se presentan las siguientes áreas: i) Empleo de materiales de partida renovables, ii) Economía atómica, iii) Empleo de disolventes más limpios (disolventes en condiciones su-

percríticas, química en agua, reacciones sin disolvente, etc.), iv) Condiciones de reacción alternativas (microondas, electroquímica), v) Catálisis: catalizadores ácido-base, catalizadores *redox*, *imprinting* de catalizadores sólidos etc., vi) Biocatálisis: procesos catalizados por enzimas o células enteras, empleo de organismos modificados genéticamente, vii) Fotoquímica y fotocatalisis, viii) Polímeros biodegradables y su uso en procesos químicos.

- Reconocer la toxicidad/peligro como una propiedad física/estructural que puede ser diseñada y manipulada.
- Presentar ejemplos de procesos industriales donde se cumplen los principios de la química sostenible.
- Familiarizarse con las tendencias actuales de la química verde para poder realizar un análisis crítico sobre el grado de cumplimiento de los postulados de la química sostenible en un determinado proceso industrial.

De acuerdo con estos objetivos, las competencias profesionales mínimas que deben alcanzar los estudiantes son: poseer un conocimiento avanzado de los con-

ceptos generales arriba reseñados de química sostenible, así como de las principales técnicas y metodologías implicadas. Aunque el estudiante pueda haber realizado una intensificación específica en alguna de dichas técnicas y metodologías, se espera que al acabar sus estudios disponga al menos de un conocimiento suficiente de la mayor parte de ellas.

Del mismo modo, un estudiante que finalice este programa de postgrado debe poseer, entre otras, las siguientes aptitudes y destrezas:

- Evaluar el grado de sostenibilidad de un proceso químico o reacción química.
- Evaluar el grado de riesgo de un proceso/reacción química y la toxicidad de los compuestos implicados.
- Ser capaz de trabajar experimentalmente con una o varias de las siguientes técnicas:
 - Biotransformaciones.
 - Trabajo con disolventes no convencionales (líquidos iónicos, fluidos supercríticos...).
 - Transformaciones catalíticas.
 - Empleo de técnicas alternativas para el suministro de energía en procesos químicos (electroquímica, fo-

toquímica, irradiación por microondas, ultrasonidos...).

- Diseñar la modificación de un proceso químico existente con objeto de mejorar su impacto ambiental y la sostenibilidad del mismo.
- Diseñar nuevos productos en función de la sostenibilidad tanto del proceso de fabricación como de los procesos que los utilicen.
- Diseñar nuevos procesos químicos para la preparación de un determinado compuesto con objeto de optimizar la sostenibilidad de los mismos.

Las materias impartidas se encuentran recogidas en el Cuadro 2. En estos programas postgrado participan actualmente profesores de más de 15 universidades y centros de investigación.

Desde la perspectiva de la creación del Espacio Europeo de Educación Superior, las iniciativas nacionales deben ser un paso para crear un sistema coherente de formación en química sostenible a un nivel europeo.

El objetivo central de nuestro esfuerzo debe ser la consecución de un programa europeo de máster y doctorado en química sostenible. ♦

PARA SABER MÁS

- | | | | |
|---|--|---|--|
| <p>[1] Anastas, P.T. y Warner, J.C. (1998). <i>Green Chemistry: Theory and Practice</i>. Ed. Oxford.</p> <p>[2] Anastas, P.T. y Kirchoff, M.M. (2002). <i>Origin, Current Status, and Challenges of Green Chemistry</i>. <i>Acc. Chem. Res.</i> 35: 686-694.</p> <p>[3] Warner, J.C., Cannon, A.S. y Dye, K.M. (2004). <i>Green Chemistry. Environmental Impact Assessment Review</i>. 24: 755-799.</p> <p>[4] Mestres, R. (2004). A brief structured view of Green Chemistry issues. <i>Green Chem.</i> G10-G12.</p> <p>[5] REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances). Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2. http://ec.europa.eu/environment/chemicals/reach/reach_intro.htm</p> | <p>[6] Green Chemistry Institute. http://www.chemistry.org/green-chemistryinstitute</p> <p>[7] Green Chemistry Network. http://www.chemsoc.org/networks/gnc/</p> <p>[8] INCA. http://helios.unive.it/inca/</p> <p>[9] Green and Sustainable Network. http://www.gscn.net/indexE.html</p> <p>[10] SusChem España. http://www.ptequimicasostenible.org/</p> <p>[11] Red Española de Química Sostenible. http://noema2bis.unizar.es:8080/redqs/</p> <p>[12] SusChem. <i>Reaction & Process Design Report</i> (2005). http://www.suschem.org/</p> <p>[13] Loupy, A. (2006) <i>Microwaves in Organic Synthesis</i>. 2a edición. Ed. Wiley.</p> <p>[14] Díaz-Ortiz, A., de la Hoz, A., Moreno, A. (2004) <i>Selectivity in Organic</i></p> | <p><i>Synthesis under Microwave Irradiation</i>. <i>Current Organic Chemistry</i>. 8: 903-918.</p> <p>[15] Díaz-Ortiz, A., de la Hoz, A., Moreno, A. (2005) <i>Microwaves in Organic Synthesis. Thermal and Non Thermal Microwave Effects</i>. <i>Chem. Soc. Rev.</i> 164-178.</p> <p>[16] De la Hoz, A., Prieto, M. P., Díaz-Ortiz, A., Moreno, A., Sánchez Mi-gallón, A., Vázquez, E., Carrillo. J.R. (2007) <i>Microwave-Assisted Reactions in Heterocyclic Compounds with Applications in Medicinal and Supramolecular Chemistry</i>. <i>Comb. Chem. High Throughput Screening</i>. 10: 877-902.</p> <p>[17] Lancaster, M. (2002) <i>Green Chemistry: an Introductory text</i>. Ed. Royal Society of Chemistry.</p> <p>[18] <i>Sustainability in the organic chemistry lab course</i>. NOP. http://www.oc-praktikum.de/</p> | <p>[19] Leadbeater, N. y McGowan, C. (2007). <i>Clean, Fast Organic Chemistry</i>. Ed. CEM.</p> <p>[20] <i>Masters Course in Green Chemistry & Sustainable Industrial Technology</i>. University of York. http://www.york.ac.uk/res/gcg/Mres/home.htm</p> <p>[21] <i>Doctorado en química sostenible</i>. Coordinadora, Universidad de Castilla-La Mancha. http://www.uclm.es/organos/vic_estudios/doctorado/20072009/cienciasES/quimicaSostenible</p> <p>[22] <i>Máster en química sostenible</i>. Coordinadora, Universidad Jaume I. http://www.uji.es/ES/infoest/estudis/postgrau/oficial/0708/quimicos.html</p> |
|---|--|---|--|