

Química sostenible: una alternativa creíble

Francisco García Calvo-Flores y José A. Dobado

Resumen: La Química Sostenible o Química Verde nace en la década de los 90 del siglo XX. Mediante sus principios, los químicos han ido mejorando los procesos productivos industriales y diseñando nuevas metodologías en los laboratorios para minimizar el impacto sobre el medio ambiente de las actividades relacionadas con la Química. También se han desarrollado procesos que utilizan materias primas renovables y reducen la energía necesaria para llevarlos a cabo. A través de redes de investigadores y diversos organismos, los químicos se han ido asociando para impulsar y desarrollar tecnologías más eficaces y respetuosas con el medio ambiente.

Palabras clave: Química Sostenible, Química Verde, Principios de la Química Sostenible, Principios de Ingeniería Sostenible, Química Medioambiental.

Abstract: The Sustainable Chemistry or Green Chemistry was born in the 90's of the twentieth century. Through their principles, chemists have been improving industrial production processes and designing new methodologies in laboratories to minimize the environmental impact of activities related to chemistry, as well as designing processes using renewable-raw materials and reducing the energy needed to carry them out. Through networks of various agencies and researchers, chemists have been combining to boost and developing technologies more respectful of the environment.

Keywords: Sustainable Chemistry, Green Chemistry, Principles of Green Chemistry, Principles of Green Engineering, Environmental Chemistry.

Introducción

La Química es una Ciencia que contribuye de forma sustancial a la mejora de la calidad de vida y al bienestar del hombre actual, aportando soluciones específicas a problemas concretos. Por ejemplo, gracias a la Química se dispone en la actualidad de fármacos que ayudan a superar enfermedades que hace sólo unos pocos años eran consideradas mortales. Así mismo, existen en el mercado compuestos fitosanitarios que aumentan la producción de cultivos fundamentales para la alimentación del hombre y su ganado, y que los protegen de plagas de muy diversa índole. Igualmente, han aparecido, en los últimos años, nuevos materiales aplicables a diferentes sectores como pueden ser el transporte, industria textil, informática, etc.

Esta rama de la Ciencia avanza constantemente, generando nuevos beneficios a la sociedad, contribuyendo al desarrollo económico y la mejora de las condiciones de vida. Paralelamente al avance y evolución de la Química, han ido apareciendo una serie de nuevos riesgos derivados de la fabricación, transporte, manipulación y eliminación de sustancias que, o bien no se encontraban en la Naturaleza con anterioridad, o que, aún siendo de origen natural, su presencia no resulta nociva por la baja concentración con la que aparecen en el medio.

Como consecuencia de estos nuevos riesgos, se generan problemas de contaminación y toxicidad de sustancias producidas por la industria química, laboratorios de investigación, o laboratorios docentes, que repercuten negativamente sobre el medio ambiente.



F. García

J. A. Dobado

Departamento de Química Orgánica. Facultad de Ciencias.
Universidad de Granada.
Campus Fuentenueva, c/ Severo Ochoa s/n. 18071 Granada (España).
C-e: fgarcia@ugr.es; dobado@ugr.es
Recibido: 18/12/2007. Aceptado: 06/03/2008.

Los profesionales de la Química no han quedado al margen de la creciente preocupación sobre los temas medioambientales que existe en la sociedad. Al contrario, han contribuido al diseño de nuevas tecnologías, que permiten ejercer un mayor control de los focos de contaminación, y también han desarrollado procedimientos que por sí mismos son más respetuosos con el medio que nos rodea. Estas actuaciones han ido encaminadas bien a una mejora en las tecnologías utilizadas, o bien al diseño de sustancias que realizan las mismas funciones que otras ya existentes, pero con un impacto ambiental mucho menor. Simultáneamente, se han desarrollado procesos que utilizan materias primas renovables y que reducen la energía necesaria para llevarlos a cabo. Bajo este contexto, nace la llamada Química Sostenible^[1] o Química Verde,^[2] entendida como la actividad dentro de la Química que *se ocupa del diseño de productos y procesos que reducen o eliminan la producción y el uso de sustancias peligrosas o tóxicas*. La Química Sostenible o Química Verde no debe considerarse como una especialidad dentro de la Química, tal y como sucede con la división clásica de Química Orgánica, Inorgánica, Analítica, o Ingeniería Química, sino más bien como una estrategia global que debe impregnar la actividad de los químicos.

Química y sociedad

La percepción sobre la Química que presenta la sociedad actual ha evolucionado en los últimos años en un sentido bastante negativo. En los años 50 y 60, la aparición de nuevos productos y materiales se consideraba como el resultado de una evolución positiva del desarrollo de la Ciencia en general, y de la Química, en particular. A partir de los años 70, y especialmente en las décadas de los 80 y 90, la Química ha adquirido una mala imagen en la sociedad. El apelativo *químico* o *química* se ha convertido en sinónimo de negativo, peligroso, o socialmente pernicioso. En ocasiones, dicha idea es consecuencia de hechos reales, en otros muchos casos se debe a una percepción distorsionada de la realidad.

A esta asociación equívoca de ideas contribuyen tres cuestiones fundamentales:

1. Falta de formación científica en los niveles educativos

básicos: La disminución del número de horas que los planes de estudios actuales dedican a materias de contenido científico, motiva que el conocimiento que tienen la mayoría de los estudiantes de enseñanzas medias sea muy limitado. Una vez superada la etapa de estudiante, una mayoría presenta escaso interés por temas de ciencia y una formación deficiente.

2. Insuficiente divulgación de sus resultados científicos fuera de su ámbito profesional: En muchas ocasiones, la comunidad científica no realiza el esfuerzo suficiente por abrirse a la sociedad, haciendo pedagogía sobre la relación directa existente entre avance científico y mejora sobre la calidad de vida. Por tanto, resulta deseable una mayor implicación en la difusión del conocimiento, de los profesionales de la Química, bien de forma individual o bien a través de sociedades y agrupaciones científicas.

3. Medios de comunicación: En la sociedad actual, el papel que representan los medios de comunicación para la difusión de conocimientos es fundamental. Es cierto que hay publicaciones especializadas de divulgación científica o programas de radio y televisión dedicados a la difusión de la Ciencia pero, desgraciadamente, la mayoría de las noticias que aparecen en los medios de comunicación, sobre temas relacionados con la Química, inciden en los aspectos más negativos como: vertidos incontrolados, accidentes, sustancias tóxicas, contaminación, etc. Este hecho, unido a la escasa preparación de muchos profesionales de la información sobre temas científicos, hace que las noticias de ciencia lleguen al gran público bastante distorsionadas. Todo lo anterior constituye una barrera que por el momento es difícil de superar y que separa Ciencia y sociedad.

Dada la preocupación existente en la sociedad por los impactos negativos de la Química en el entorno, se ha generado, entre los profesionales de la Química, un interés creciente por eliminar las malas prácticas, disminuir en lo posible el impacto negativo sobre el medio de la actividad de laboratorios y fábricas, y mejorar la imagen de esta Ciencia frente a la sociedad. En ese sentido, se ha realizado en los últimos años un considerable esfuerzo en esta dirección. Como ejemplo y resumen de esta tendencia, es de reseñar el contenido del código de conducta^[3] para profesionales de la Química, aprobado en 1994 por la *American Chemical Society* (ACS) y revisado en 2007.

Según dicho código, los químicos tienen como responsabilidad profesional:

- "servir al interés público, al avance del conocimiento científico..."
- "preocuparse activamente de la salud y el bienestar de sus colegas, de los consumidores y de la comunidad en general..."
- "sus comentarios públicos sobre temas científicos deben ser hechos con cuidado y precisión, de forma que las declaraciones públicas no sean exageradas, prematuras o con falta de rigor..."
- "esforzarse en comprender y anticiparse a las consecuencias medioambientales de su trabajo..."
- "minimizar la contaminación y proteger el medioambiente..."

Precedentes de la Química Sostenible

En los últimos años han aparecido una serie de documentos y publicaciones institucionales que recogen el sentir de la sociedad, como fruto de la preocupación de diferentes estamentos por los problemas medioambientales, que se han generado por las malas prácticas en la producción y utilización de sustancias químicas peligrosas.

En primer lugar, Naciones Unidas, a través de su programa para el Medio Ambiente (*United Nations Environment Programme*),^[4] impulsó la firma, en 1988, de la "*Declaración Internacional sobre una Producción más Limpia*".^[5] En este programa, se describe una "*estrategia preventiva integral de procesos, productos y servicios, en aras del bien social, sanitario, medioambiental y la seguridad*", basados en conceptos como, Ecoeficiencia,^[6] Productividad Ecológica^[7] y Prevención de la Contaminación.^[8]

También son de destacar las aportaciones surgidas desde el mundo de la industria, impulsadas por el Consejo Mundial para el Desarrollo Sostenible^[9] (*World Business Council for Sustainable Development*). Dicha entidad internacional está constituida por más de 125 grandes empresas de 35 países, relacionadas con 20 sectores industriales. Dicho consorcio se agrupa en torno a tres conceptos:

- Crecimiento económico^[10]
- Equilibrio ecológico^[11]
- Desarrollo social^[12]

Este consejo se ha convertido en un foro que, desde 1990, promueve el desarrollo sostenible dentro del mundo de la Industria. En tercer lugar, cabe señalar a la *Agencia de Protección del Medio Ambiente* de EEUU (*Environmental Protection Agency*, EPA),^[13] que, en 1990, a través un documento denominado *Acta de Prevención de la Contaminación* (*Pollution Prevention Act*),^[14] establece las políticas a seguir en EEUU para "*prevenir o reducir la contaminación en cualquier ocasión que sea posible*". A partir de este momento, una oficina dentro de la EPA, la *Oficina para la Prevención de Contaminación y Sustancias Tóxicas* (*Office for Pollution Prevention and Toxics*, OPPT),^[15] promueve la preparación y fabricación de nuevos productos químicos menos peligrosos para la salud humana y para el medio ambiente. El objetivo marcado es la sustitución de las sustancias peligrosas usadas en la industria, y la mejora de los métodos de producción ya existentes, para minimizar el impacto ambiental. Con estas bases, se crea, en 1991, un proyecto específico dentro del programa "Diseño para el Medio Ambiente" de la EPA (*Design for the Environment*, DfE), que se denomina "Rutas Sintéticas Alternativas" para la Prevención de la Contaminación" (*Alternative Synthetic Pathways for Pollution Prevention*). Dicho programa se considera como el punto de partida de la Química Verde o Química Sostenible. Paralelamente, la administración Clinton puso en marcha el denominado "Certamen Presidencial sobre Química Verde" (*Presidential Green Chemistry Challenge*), que surge de la colaboración entre el programa "Diseño para el Medio Ambiente" de la EPA (DfE) y la comunidad científica. Dicho certamen ha contribuido de forma sustancial al desarrollo de la Química Sostenible. Desde 1996, se otorgan cinco premios anuales centrados en las siguientes áreas prioritarias de la Química Sostenible: "*Rutas sintéticas alternativas*", "*Condiciones de*

reacción alternativas", y "Diseño de compuestos químicos más seguros".

Las categorías para cada uno de los premios son:

- 1) Investigadores del mundo académico en alguna de las áreas prioritarias.
- 2) Proyectos de Química sostenible desarrollados por pequeñas y medianas empresas.
- 3) Procedimientos sintéticos alternativos.
- 4) Condiciones de reacción alternativos.
- 5) Diseño de compuestos químicos más seguros.

Entre estos premios, los tres últimos están convocados para el sector industrial, dentro de las áreas prioritarias que marca la agencia.

Principios de la Química Sostenible

P.T. Anastas^[16] y J.C. Warner,^[17] en su libro *Green Chemistry: Theory and Practice*,^[18] recogen, en los denominados "doce principios", las ideas básicas que propicia la Química Verde. Estos autores sistematizaron los campos de actuación y los objetivos hacia los que dirigir el esfuerzo de investigadores e ingenieros, si se quiere hacer de la Química una actividad menos agresiva con el medio. Dichos principios son los siguientes:

- 1. Prevención:** Es mejor prevenir, desde el principio y en cualquier proceso, la generación de residuos que eliminarlos una vez que se han creado.
- 2. Economía Atómica:** El concepto de economía atómica fue introducido en 1991^[19] por B.M. Trost,^[20] como una medida de la eficiencia de una reacción. La idea se basa en el diseño de métodos sintéticos en los que la incorporación al producto final de todos los materiales usados en la síntesis sea la mayor posible. Esto provoca que los pasos necesarios para la obtención de una sustancia sean lo más selectivos posibles y se minimice la formación de subproductos y, por tanto, de residuos.
- 3. Uso de tecnologías más seguras:** 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.
- 4. Diseño de productos químicos más seguros:** Los productos químicos deberán diseñarse para efectuar la función deseada, reduciendo al mínimo su toxicidad.
- 5. Uso de disolventes y productos auxiliares más seguros:** El uso de las sustancias auxiliares, como por ejemplo, disolventes, agentes de separación, grupos protectores, etc., deberán reducirse e incluso, si es posible, eliminarse. En caso de ser necesarios, deberán ser lo menos agresivos con el medio ambiente.
- 6. Eficiencia energética:** Los requerimientos energéticos deberán clasificarse por su impacto medioambiental y económico, reduciéndose todo lo posible la incidencia en el medio ambiente y los costes de producción. Se intentarán llevar a cabo los métodos de síntesis a temperatura ambiente y presión atmosférica.
- 7. Uso de materias primas renovables:** Las materias primas deben ser preferentemente renovables en lugar de no renovables, siempre que, desde el punto de vista técnico y económico, sea posible.

8. Reducción de derivados: La formación de derivados debe ser reducida al mínimo o, si es posible, evitarla, porque esto requiere reactivos y disolventes adicionales que generan más residuos.

9. Catálisis: Es preferible potenciar el uso de catalizadores lo más selectivos posible, frente al empleo de reactivos en cantidades estequiométricas.

10. Degradación controlada: Los productos químicos deberán diseñarse de modo que en el final de su vida útil no persistan en el medio ambiente y se degraden de forma controlada.

11. Análisis en tiempo real para la prevención de la contaminación: Se desarrollarán al máximo los procedimientos y metodologías analíticas que permitan monitorizar y controlar en tiempo real la formación de sustancias potencialmente peligrosas.

12. Reducción del potencial de accidentes químicos: Se elegirán las sustancias para la realización de los procesos químicos de forma que se minimicen los riesgos de accidentes químicos, incluidas las emanaciones, explosiones e incendios.

La aplicación de los principios de Química Sostenible al campo industrial ha conducido a Anastas y Zimmerman a formular los denominados doce principios de Ingeniería Verde o Sostenible (*Green Engineering*).^[21]

- 1. "Esencial" mejor que "circunstancial":** Los diseñadores de procesos deben esforzarse para que los métodos de aporte de energía y materia sean, por sí mismos, lo menos peligrosos dentro de lo posible.
- 2. Prevención en lugar de tratamiento:** Es mejor prevenir la formación de desechos que tratar o limpiar los posibles residuos.
- 3. Diseñar para la separación:** Las operaciones de separación y purificación deben diseñarse minimizando el consumo de materia y energía.
- 4. Maximizar la eficiencia:** Productos finales, sistemas y procedimientos han de idearse para hacer máxima la eficiencia en el uso de masa, energía o espacio.
- 5. "Producción" mejor que "materias primas":** Deberán favorecerse los esfuerzos para la mejora de productos finales, sistemas y procesos, y disminuir el esfuerzo en el uso y manipulación de materias de partida y energía.
- 6. Conservar la complejidad:** La complejidad de un sistema y el factor entrópico asociado al mismo, deben considerarse como una inversión por sí misma, cuando se toman decisiones en el diseño del reciclado, reutilización o aprovechamiento.
- 7. "Durabilidad" mejor que "inmortalidad":** Aumentar la estabilidad del producto a lo largo de su vida útil, evitando la supervivencia de los materiales, una vez que ha cumplido su ciclo vital, con el objetivo de evitar problemas de contaminación.
- 8. Afrontar la necesidad, minimizar el exceso:** Diseñar para lo superfluo o accesorio se debe considerar como un defecto.
- 9. Minimizar la diversificación de las materias primas:** En un sistema de productos multicomponentes la diversidad de los materiales de partida debe minimizarse para facilitar su reciclado y mantener el valor de los materiales usados.

10. Integrar los flujos de materia y energía: El diseño de productos, sistemas y procesos deben incluir la interconexión entre los diferentes flujos de materia y energía.

11. Diseño de un uso comercial de productos más allá de su vida útil: Los productos, sistemas y procesos deben diseñarse desde un principio para dar un uso comercial a los bienes producidos, una vez que ha finalizado la vida útil de los mismos.

12. "Renovable" mejor que "agotable": Los suministros de materia y energía deberían ser renovables en lugar de agotables.

Objetivos de la Química Sostenible

Los mencionados doce principios de la Química Sostenible son aplicables tanto a las diversas ramas de la industria química como a la actividad desarrollada en laboratorios de investigación y laboratorios docentes a cualquier nivel. Partiendo de estos principios, es posible marcar los siguientes objetivos generales que permitan hacer "verdes", es decir, reducir el impacto ambiental de las condiciones de reacción y las tecnologías aplicadas para desarrollarlas.

- Reducir los residuos que se generan en cualquier proceso de preparación o manipulación de sustancias químicas.
- Preparar materiales por procedimientos mejorados que disminuyan los efectos no deseados sobre el medio ambiente.
- Sustituir aquellos materiales que, por su toxicidad intrínseca, resulten peligrosos por otros con las mismas propiedades y aplicaciones, y que causen menor impacto sobre el medio ambiente.
- Reducir la energía necesaria para producir sustancias de interés, bien por el uso de procedimientos de menor duración, o bien por el uso de energías renovables que supongan un menor costo energético con igual eficiencia.
- Reducir la toxicidad o peligrosidad general de las sustancias necesarias para obtener un determinado compuesto y la del propio compuesto.
- Reducir los costos, eliminando toda manipulación que no sea estrictamente necesaria y disminuyendo los tiempos que se invierten en la preparación de una sustancia.
- Impulsar todas las acciones necesarias para hacer la Química compatible con un desarrollo sostenible.

Estado actual de la Química Sostenible

La Química Sostenible se ha ido consolidando, a lo largo de los últimos años, como una alternativa creíble a los procedimientos y métodos tradicionales, tanto en el mundo de la industria química como en la investigación pura o aplicada o en la docencia. Con el transcurso de los años se han consolidado diversas líneas de actuación que conforman toda una infraestructura mundial relacionada, directa o indirectamente, con la Química Sostenible. Se pueden considerar tres niveles organizativos:

a) Organismos nacionales o internacionales para la delimitación de los sectores estratégicos.

En primer lugar, hay que considerar las instituciones nacionales o internacionales que marcan las directrices y canalizan los fondos y ayudas destinados a investigación (públicos o

privados) ejerciendo, en muchos casos, una labor de coordinación y comunicación entre los distintos sectores interesados. Ya se ha comentado el papel de la EPA en EEUU como entidad impulsora de proyectos y actividades relacionadas con la Química Verde. La UE, como parte del inicio de una política científica europea común, ha propiciado la creación de un total de 27 plataformas tecnológicas para el desarrollo científico e industrial en sectores estratégicos, con una amplia participación del sector empresarial privado. Una de estas plataformas es la Plataforma Tecnológica Europea de Química Sostenible (*European Technology Platform for Sustainable Chemistry*),^[22] que tiene por objetivo promover la investigación en Química e Ingeniería Química en tres campos fundamentales:

- Biotecnología industrial.
- Tecnología de materiales.
- Reacciones y diseño de procesos.

b) Redes de investigadores

En otro plano de actuación, se situarían las redes de investigadores, formadas por agrupaciones de científicos. Entre todos ellos, destaca el *Green Chemistry Institute*^[23] patrocinado por la ACS. A este Instituto se unen otras redes de investigadores de carácter nacional pertenecientes a los siguientes 24 países, constituyendo una auténtica red mundial de Química Sostenible (Tabla 1).

Tabla 1. Países de procedencia de investigadores asociados al *Green Chemistry Institute*.

Argentina	Australia	Brasil
Canadá	China	España
Estonia	Etiopía	Finlandia
Grecia	Hungría	India
Italia	Japón	México
Nepal	N. Zelanda	Reino Unido
Senegal	Sudáfrica	Suecia
Taiwan	Tailandia	Uruguay

En lo que a España se refiere, se encuentra la denominada Red Española de Química Sostenible (REQS),^[24] un consorcio integrado por 242 entidades, distribuidas en 6 sectores:

- 33 Asociaciones.
- 20 Centros Tecnológicos.
- 99 Empresas.
- 34 Centros Universitarios.
- 26 Organismos Públicos de diversa índole.
- 30 Agencias, Sociedades y Centros Observadores.

La REQS tiene por objetivo "*promover el desarrollo de procesos de producción y transformación que no contaminen, que sean respetuosos con el medio ambiente y que preserven al máximo los recursos naturales, así como posicionarse como interlocutor válido en esta materia, ante la sociedad, el sector productivo y las administraciones públicas*".

Debemos destacar la existencia de un Programa Interuniversitario de Doctorado en "Química Sostenible", que ha recibido la mención de calidad del MEC y que lleva impartiendo varios cursos consecutivos, organizado por la REQS.

c) Institutos o Grupos de investigación de actividad exclusiva en Química Sostenible.

Un tercer grupo lo constituyen entidades, institutos de investigación o grupos de investigación, en muchos casos con carácter interdisciplinar, que centran su actividad en métodos específicos de *Química Sostenible*. En la Tabla 2, se muestran algunos ejemplos de grupos de investigación o institutos de otros países.

Tabla 2. Institutos y grupos de investigación pertenecientes a otros países con sus respectivas áreas de interés.

Organismo (país)	Áreas de interés
Center for Green Manufacturing ^[a] U. de Alabama (EEUU)	Líquidos iónicos
Center for Sustainable and Green Chemistry ^[b] U. Técnica de Dinamarca (Dinamarca)	Combustibles y productos químicos a partir de fuentes renovables
Clean Technology ^[c] U. de Nottingham (Reino Unido)	Fluidos supercríticos
Institute for Green Oxidation Chemistry ^[d] U. de Carnegie Mellon (EEUU)	Nuevos catalizadores para la activación del peróxido de hidrógeno
Leeds Cleaner Synthesis Group ^[e] U. de Leeds (Reino Unido)	Nuevos métodos sintéticos
Leicester Green Chemistry Group ^[f] U. de Leicester (Reino Unido)	Líquidos iónicos, fluidos supercríticos y catálisis
Queen's University Ionic Liquid Laboratories ^[g] U. de Queen's, Belfast (Reino Unido)	Líquidos iónicos
The NSF Science and Technology Center for Environmentally ^[h] Con sede en la U. de Carolina del Norte, y participación de varias universidades (EEUU y Canadá)	Investigación multidisciplinar desarrollada con tecnologías relacionadas con el uso del CO ₂
The Reading Centre for Surface Science and Catalysis ^[i] U. de Reading (Reino Unido)	Catálisis
Green Chemistry Group U. de York (Reino Unido) ^[j]	Catálisis y nuevos materiales a partir de fuentes renovables

[a] <http://bama.ua.edu/~cgm>

[b] <http://www.csg.dtu.dk>

[c] <http://www.nottingham.ac.uk/supercritical/beta>

[d] <http://www.chem.cmu.edu/groups/Collins>

[e] <http://www.chem.leeds.ac.uk/People/CMR>

[f] <http://www.le.ac.uk/chemistry/greenchem>

[g] <http://quill.qub.ac.uk>

[h] <http://www.nsfstc.unc.edu>

[i] <http://www.chem.rdg.ac.uk/dept/catrg>

[j] <http://www.york.ac.uk/res/gcg/GCG>

Conclusiones

La Química sostenible se ha ido conformando, a lo largo de los últimos años, como una forma viable de abordar el desarrollo de la Química. La aplicación de los doce principios de la Química Verde en la industria e investigación, ya sea pura o aplicada, así como en la docencia va avanzando, debido al enorme interés por las distintas líneas de trabajo que propugna esta Química sostenible. Por todo ello, se hace necesario una mayor difusión e incorporación de estos contenidos

y directrices en la docencia de la Química, como parte de la formación académica de los futuros profesionales. Bajo esta perspectiva, adquieren todo su sentido las palabras pronunciadas por D. Busch,^[25] presidente de la ACS en el año 2000:

"La *Química Verde* representa los pilares que mantendrán nuestro futuro sostenible. Es imprescindible enseñar el valor de la *Química Verde* a los químicos del mañana".

Bibliografía de Química Sostenible

- *Green Chemistry: Theory & Practice*, P. T. Anastas, J. C. Warner; OUP, Oxford, 2ª Ed. (2000).
- *Real-World Cases in Green Chemistry*, M. C. Cann, M. E. Connelly, ACS (2000).
- *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*, D. T. Allen, D. R. Shonnard, Prentice Hall PTR (2001).
- *Introduction to Green Chemistry*, A. Matlack, CRC, 1st Ed. (2001).
- *Advancing Sustainability through Green Chemistry and Engineering*, (ACS Symposium Series), R. L. Lankey, P.T. Anastas (Eds.), ACS (2002).
- *Handbook of green chemistry and technology*, J.H. Clark, D. Macquarrie (Eds.), Wiley-Blackwell (2002).
- *Green Chemistry: An Introductory Text*, M. Lancaster, RSC, 1a Ed. (2002).
- *Greener Approaches to Undergraduate Chemistry Experiments*, M. M. Kirchhoff, ACS (2002).
- *Going Green: Integrating Green Chemistry into the Curriculum*, K. Parent, M. Kirchhoff (Eds.), ACS (2004).
- *Green Organic Chemistry, Strategies, Tools, and Laboratory Experiments*, K. M. Doxsee, J. E. Hutchison, Thomson-Brooks/Cole Publishing Co. (2004).
- *Green Chemistry and the Ten Commandments of Sustainability*, S. E. Manahan, ChemChar Research Inc., 2ª Ed. (2005).
- *Methods and Reagents for Green Chemistry: An Introduction*, A. Perosa, F. Zecchini, Wiley-Interscience (2007).
- *Green Chemistry and Engineering*, M. Doble, A. Kumar, Academic Press, 1a Ed. (2007).
- *Green Chemistry and Catalysis*, R. A. Sheldon, I. W. C. E. Arends, U. Hanefeld, Wiley-Interscience (2007).

Libros en español

- *Química Verde: Experimentos de Laboratorio para un Curso Universitario de Química*, M. M. Kirchhoff, ACS (2002).
- *Química Verde*, X. Domènech, Rubes Editorial (2005).
- *Procesos Orgánicos de Bajo Impacto Ambiental: Química Verde*, M. P. Cabildo Miranda, C. Cornago Ramírez, S. Escolásticos León, M.A. Esteban Santos, M.A. Farrán Morales, M Pérez Torralba, D. Sanz del Castillo, UNED (2006).

Publicaciones periódicas de Química Sostenible

En la tabla 3 se listan algunas revistas específicas junto a la editorial y la fecha de inicio de su publicación.

Tabla 3. Publicaciones específicas de Química Sostenible

Revista	Editorial	Inicio de la publicación
<i>Journal of Cleaner Production</i> ,	Elservier	1993
<i>Green Chemistry</i>	Royal Society of Chemistry	1999
<i>Green Chemistry Letters and Reviews</i>	Taylor & Francis, Routledge, Psychology Press	2007
<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	Springer-Verlag	2008

Números especiales de revistas

- *Pure and Applied Chemistry*, 72 (7), 2000.
- *Account of Chemical Research*, 35 (9), 2002.
- *Science*, 297 (5582), 2002.
- *Chemical Reviews*, 107 (6), 2007.

Bibliografía y Notas

- [1] R. Mestres, *An. Quím.*, 2003, 99, 58–65.
- [2] Está aceptado, en la sociedad actual, el calificativo verde como beneficioso, o al menos, no agresivo con el medio ambiente.
- [3] Aprobado por el Consejo de la ACS de Marzo de 2007 y adoptado por Junta Directiva de este organismo en Junio de 2007.
- [4] <http://www.unep.org>
- [5] Documento original en: <http://www.uneptie.org/pc/cp/declaration/translations/spanish.htm>
- [6] Resultado alcanzado por el reparto de bienes y servicios a precios competitivos que satisfacen las necesidades humanas y aportan calidad de vida, a la vez que reducen progresivamente el impacto ecológico y la intensidad de recursos a lo largo del ciclo vital, a un nivel similar a la capacidad de carga calculada para la Tierra.
- [7] Los ecosistemas generan recursos a partir de sus propios desechos que se aprovechan *in situ* de manera que se establece un equilibrio entre los componentes del propio ecosistema.
- [8] Minimizar la generación de residuos durante el proceso de producción y no el tratamiento posterior de los mismos, ya que dicho tratamiento no supone una disminución *per se* de los residuos globales.
- [9] Según la ONU, se define desarrollo sostenible como el "que satisfaga las necesidades del presente, sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades".
- [10] El concepto de crecimiento económico se refiere al incremento porcentual del producto interior bruto de una economía en un período de tiempo.
- [11] A nuestro alrededor, vemos multiplicarse las pruebas del daño causado por el hombre en muchas regiones de la Tierra: niveles peligrosos de contaminación del agua, aire, tierra y seres vivos; grandes trastornos del equilibrio ecológico de la biosfera; destrucción y agotamiento de recursos insustituibles y graves deficiencias, nocivas para la salud física, mental y social del hombre, en el medio por él creado, especialmente en aquel en que vive y trabaja (*Report of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 5–16 de Junio de 1972*).
- [12] El desarrollo social ha sido uno de los pilares de las Naciones Unidas desde su fundación y está estrechamente vinculado con el desarrollo económico. La ONU ha hecho hincapié en el desarrollo social como parte fundamental para garantizar la mejora de la vida de todas las personas.
- [13] <http://www.epa.gov>
- [14] Documento original en: <http://www.epa.gov/opptintr/p2home/p2policy/act1990.htm>
- [15] <http://www.epa.gov/opptintr/opptabt.htm>
- [16] Paul T. Anastas es director del *Green Chemistry Institute de la American Chemical Society*, considerado como el padre de la Química Sostenible.
- [17] John C. Warner es presidente del Instituto *Warner Babcock de Química Verde*.
- [18] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, OUP, New York, 1998.
- [19] B. M. Trost, *Science* 1991, 254, 1471–1477.
- [20] Barry M. Trost es profesor de la Universidad de Stanford. <http://www.stanford.edu/group/bmtrost>
- [21] P. T. Anastas, J. B. Zimmerman, *Env. Sci. & Tech.*, 2003, 37, 95–101.
- [22] <http://www.suschem.org>
- [23] <http://www.acs.org>
- [24] <http://www.pte-quimicasostenible.org>
- [25] Daryle H. Busch es profesor de la Universidad de Kansas. <http://www.chem.ku.edu/busch>

