



La Química Verde, su origen, sus principios y aplicaciones

Romina A. Arreche*, Katerine Igal, Patricia G. Vázquez

Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. Jorge J. Ronco" CINDECA, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, Calle 47 N° 257, B1900AJK, La Plata, Argentina.

**E-mail: arrecheromina@gmail.com*

Palabras Claves: química verde, principios, catálisis

Resumen

La química verde ha surgido como un enfoque especial de la química en general, y tiene como objetivo prevenir o minimizar la contaminación desde su origen, tanto a escala industrial como en laboratorios de investigación y economizar tiempo y recursos. Así pues, la química verde se ocupa del diseño de productos y procesos químicos que reducen o eliminan el uso y producción de sustancias peligrosas, donde la catálisis es uno de los pilares de este nuevo proceso.

Abstract

Green chemistry has emerged as a special focus of chemistry in general, and aims to prevent or minimize pollution at source, both in industry and in research laboratories and save time and resources. Thus, green chemistry specializes in the design of chemical products and processes that reduce or eliminate the use and generation of hazardous substances, where catalysis is one of the pillars of this new process.

Introducción

En los años noventa se extendió el consenso sobre el hecho que el desarrollo sostenible tendría tres componentes o pilares: el ecológico, el económico y el social. Se trata, así, de combinar en un modelo deseable de sociedad, valores ecológicos (*sustentabilidad, preservación del mundo natural por sí mismo*), económicos (*eficiencia, satisfacción de las necesidades y aspiraciones humanas*) y sociales (*justicia distributiva, eliminación de diferencia por genero*). Esta combinación es circunstancial, no necesaria. Importa no llevarnos a engaños sobre este punto y ser conscientes que la relación entre estos distintos objetivos (*justicia social, sustentabilidad ecológica, protección del mundo natural, etc.*) puede ser muy conflictiva. Hay que subrayar que la sustentabilidad y, por ende el desarrollo sostenible, no es un principio de carácter científico-técnico, aunque incluya componentes que lo son, sino que tiene un carácter irremediamente normativo: que la vida humana sobre este planeta se perpetúe.

La química ha sido y es una fuente de bienestar y comodidad para el ser humano. De alguna manera, al dar origen a los diversos productos que cada día nos simplifican y hacen más agradable la vida, se ha ganado buena parte del crédito por el mejoramiento del nivel de vida que actualmente disfrutamos. Hasta hace algunos años se consideraba que el desarrollo tecnológico implicaba necesariamente un costo ambiental que pagar y un peligro potencial para el ciudadano común. Del mismo modo, no se tenía conciencia de la posibilidad del agotamiento de los recursos naturales

empleados como materias primas de los procesos de producción. Otro problema era la inadecuada disposición de desechos directamente y de manera indiscriminada al aire, al agua y al suelo.

Si la química verde se interpreta en un sentido amplio y sirve para incluir las nuevas tecnologías químicas del tratamiento de residuos o de procesos más limpios en la fabricación de productos peligrosos o las industrias químicas que transfieren simplemente los riesgos del ciclo vital de los productos a plantas en el extranjero o a los vertederos, entonces el espíritu constructivo de esta química se verá traicionado y el término aparecerá hueco y mentiroso [1].

Como un objetivo general, en este trabajo, se busca tratar de diferenciar una nueva química específicamente *limpia* de una que lo sea netamente *verde*. De momento, el mejor juicio quizás sea valorar si la química es más verde que en las aproximaciones convencionales, pero siendo conscientes de que para juzgarla más verde ha de conocerse mínimamente como los cambios en la química afectan las otras condiciones a lo largo del ciclo de vida. Por ejemplo, un camino alternativo de síntesis que emplee menos productos químicos peligrosos en los procesos no debería ser juzgado como verde a la ligera, si requiere mayores cantidades de energía para conseguir altas presiones o temperaturas. La química verde ha de basarse en la comprensión de la salud pública y los procesos ecológicos. La transición hacia una química más respetuosa con el entorno y la salud pública no será fácil. La formación química convencional no incluye temas relativos al funcionamiento de los ecosistemas, toxicología, farmacología o fisiología humana. Hay una gran necesidad de reconsiderar los itinerarios formativos de los químicos y de los científicos en general. Cuando estos científicos estén mejor preparados para comprender la salud humana y el funcionamiento de la ecología, su investigación y desarrollo de materiales podrán introducir un conjunto de parámetros completamente nuevos para diseñar productos químicos más verdes.

Desarrollo

La química verde puede definirse como la química que utiliza de manera eficiente la materia prima, elimina la generación de residuos y evita el uso de reactivos y solventes tóxicos y/o peligrosos, en la producción y aplicación de productos químicos [2]. El término *Química Verde (Green Chemistry)* fue propuesto por Anastas a principios de la década de los años '90 [3]. Posteriormente, Trost presentó el concepto de economía atómica (*atom economy*), que describe la conversión eficiente de todos los átomos implicados, definiendo un proceso químico ideal como aquel en el cual el número de átomos ingresados y finales es el mismo [4]. Sheldon introdujo el factor E, que se define como el cociente entre la masa de residuo producido y la masa de producto deseado obtenido [5]. De este modo, se establecieron las bases de una nueva manera de pensar la Química y desarrollar una medida del grado de sustentabilidad (*greenness*) de los productos y procesos alternativos.

La química verde tiene como objetivo principal realizar nuevos procesos químicos o convertir los ya existentes en procesos que sean más benignos con el medioambiente. De este modo, surge la necesidad del desarrollo de tecnologías limpias, de manera de optimizar la sustentabilidad mejorando las condiciones del medioambiente [6]. Los desechos producidos son un eje prioritario para la química verde, el término desecho se aplica a la materia o energía que se genera en un proceso y no tiene ninguna aplicación. La generación y tratamiento de estos residuos consume tiempo, dinero y esfuerzo. Además, los desechos peligrosos demandan una inversión adicional para monitoreo y control. Las nuevas tecnologías tratan de prevenir la formación de residuos basándose en el concepto de residuo cero: todo lo que ingresa debe ser parte del producto final (economía atómica) [4].

Por tanto, como filosofía para el diseño de nuevos productos y procesos químicos, los principios de la química verde pueden ser reorganizados en un conjunto de parámetros de diseño, que potencialmente podrían ser: intensificación del proceso, simplicidad y originalidad, compatibilidad ambiental y seguridad. La simplicidad y la originalidad son valores altamente apreciados en muchas aplicaciones de diseño químico y es más probable que se desarrollen químicas ecológicamente adecuadas cuando los materiales de partida sean ecológicamente compatibles. Resulta tentador sugerir que esto significa que deberíamos preferir como materia prima materiales basados en las plantas, renovables o biomasa. Por ejemplo, si se toman el maíz y la soja como fuentes de materia prima, habrá que tratar las condiciones de la moderna agricultura industrial que entraña peligros significativos. Los fertilizantes químicos, los plaguicidas de síntesis, los productos químicos para su procesamiento, la

erosión y el agotamiento de los suelos, los problemas con el agua, los insumos de alta intensidad energética, todo ello ha de ser tomado en cuenta para valorar si una materia prima basada en productos agrícolas reúne las condiciones que define la química verde.

Por tanto es importante ir más allá de las simplificaciones que dan por supuesto que las materias primas procedentes de la agricultura son más verdes. La compatibilidad ambiental requiere que estemos más atentos a los mecanismos con que la naturaleza protege la materia y nuestros propios cuerpos contra los riesgos de los materiales peligrosos. Es aquí donde los químicos necesitan mucho más conocimiento sobre los sistemas fisiológicos y ecológicos, específicamente, sobre materiales inherentemente seguros, materiales físicamente benignos y el procesamiento de los mismos en condiciones amigables con el ambiente. Puede decirse que la seguridad ha recibido desde siempre una importante consideración en el diseño de los procesos químicos.

2.1. Principios de la Química Verde

Anastas y Warner [7] enunciaron en 1998 los doce principios de la química verde. Estos principios proporcionan un marco para diseñar y desarrollar nuevos materiales, procesos y sistemas, que sean benignos con la humanidad y su entorno, considerando factores medioambientales, sociales y económicos. Estos principios se detallan a continuación:

- *Prevención.* Es preferible prevenir la formación de residuos en lugar de tratarlos una vez formados.
- *Economía atómica.* Se deben diseñar métodos de síntesis de modo de maximizar la incorporación de todos los materiales usados durante el proceso dentro del producto final.
- *Uso de metodologías que generen productos de toxicidad reducida.* Los métodos sintéticos deben usar o generar, cuando sea posible, sustancias de baja toxicidad y bajo impacto ambiental.
- *Generación de productos eficaces de baja toxicidad.* Los productos químicos deben ser diseñados para preservar la eficacia mientras se reduce la toxicidad.
- *Reducción del uso de sustancias auxiliares.* Deben evitarse, o minimizar el uso de materiales auxiliares como solventes, agentes de separación, etc., o reemplazarlos por sustancias inocuas.
- *Minimizar el consumo energético.* El uso de energía debe ser reducido, minimizando el impacto ambiental y económico. De ser posible las síntesis deben realizarse a presión y temperatura ambiente.
- *Utilización de materia prima renovable.* Cuando sea técnica y económicamente viable, la materia prima y la energía usadas deben ser de una fuente renovable.
- *Evitar las derivatizaciones innecesarias.* Se debe evitar la formación de derivados como protección/desprotección, bloqueo de grupos y modificación temporaria de procesos físico-químicos.
- *Potenciación de la catálisis.* Se deben emplear en lo posible, procesos catalizados selectivos en lugar de procesos estequiométricos.
- *Generación de productos biodegradables.* Los productos químicos deben ser diseñados para que se degraden en productos inocuos cuando sean eliminados y, de este modo, no persistan en el ambiente.
- *Desarrollar metodologías analíticas para el monitoreo en tiempo real.* Los procesos deben ser monitoreados con el fin de evitar la formación de sustancias peligrosas.
- *Minimizar el potencial de accidentes químicos.* Los materiales empleados en un proceso químico deben ser escogidos de manera de minimizar riesgos y accidentes, incluyendo emanaciones, explosiones e incendios.

La aplicación de todos los principios en simultáneo no se puede conseguir siempre, sin embargo al llevar a cabo un proceso debería tratar de cumplirse con la mayor cantidad de ellos. En un proceso determinado deben ser evaluados los materiales y la energía usados en cada etapa. Por ejemplo, si una sustancia producida es benigna con el medioambiente, pero se preparó usando sustancias peligrosas o no renovables, el impacto solo se ha desplazado a otra parte del ciclo. Un producto o proceso eficiente

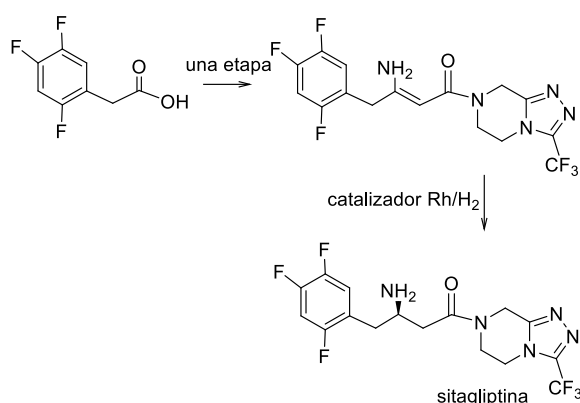
en energía, o que genere energía, pero cuya manufactura consume más energía que la ganada, entonces ese proceso no es sustentable, al diseñarlo se debe considerar el ciclo completo, incluyendo los materiales de partida y la energía requerida [8]. Por lo tanto, los doce principios se deben aplicar a cada uno de los pasos que se incluyen en el ciclo de vida de materiales, comenzando desde su adquisición (minería, perforación, cosecha, etc.) y siguiendo con su manufactura, distribución y uso.

Si nos referimos en particular al Principio 9 que destaca el rol de la catálisis (Esquema 1) [9], puede decirse que los reactivos catalíticos, tan selectivos como sea posible, resultan superiores a los reactivos estequiométricos. En general, las síntesis catalíticas, debido a su elevada selectividad, son más eficientes, limpias y económicas, permiten la reutilización del catalizador, el uso de materias primas renovables o la reducción de cantidades de reactivos.



Esquema 1. Curvas de energía de activación de una reacción química, con catalizador (2) y sin catalizador (1).

En 2006, la compañía Merck recibió el premio “Presidential Green Chemistry Challenge” en la categoría de rutas sintéticas alternativas, por proveer una síntesis catalítica innovadora que consta de seis etapas de síntesis menos que la ruta tradicional para la obtención de la sitagliptina, un derivado quiral de un β-aminoácido, principio activo del fármaco Januvia® empleado para el tratamiento de la diabetes del tipo II [10,11]. La hidrogenación de enaminas por medio de un catalizador a base de rodio (Jasiphos®) da origen a la sitagliptina con mayor rendimiento y elevado grado de pureza óptica, evitando la reproducción de cerca de 100 kg de residuos por cada 0.5 kg de producto generado (Esquema 2).

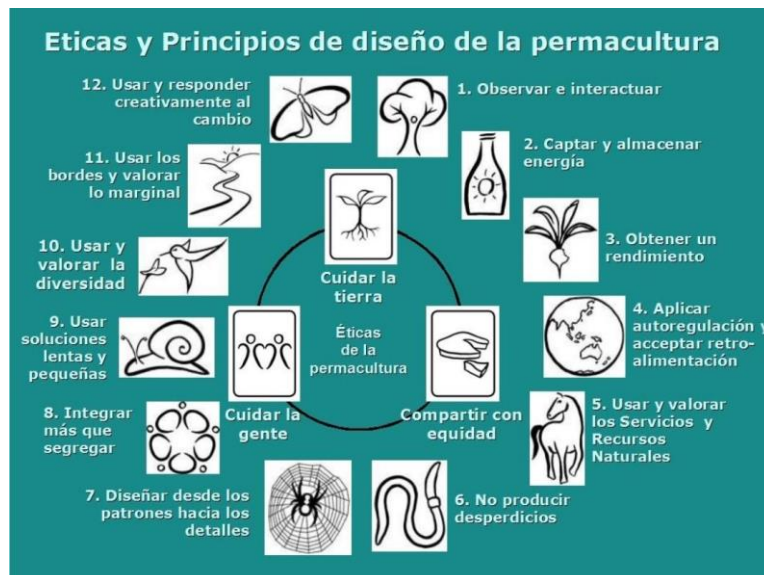


Esquema 2. Nueva ruta sintética para la obtención de la sitagliptina [12].

2.2. Permacultura

Existen otros tipos de proyectos que están siendo llevados en paralelo al de la química verde, uno de ellos es el concepto de la permacultura, que fue creado en Australia en los años '70, por Bill Mollison y David Holmgreen [13].

La permacultura produce una ecología cultivada capaz de generar más alimentos para la gente y los animales que la naturaleza a su ritmo (sin el “factor humano”). Así como la ingeniería genética ha llegado a ser capaz de crear nuevas formas de vida manejando las estructuras y elementos más íntimos de la materia viva, a su vez la permacultura ha llegado a ser capaz de producir vida abundante pero todo esto desde la perspectiva de la educación popular, metodologías participativas, el sentido comunitario y la reverencia a la vida. En un principio estuvo muy orientada al Perma-Cultivo, ya que la misma planteaba métodos alternativos al modelo de producción alimenticia de hoy en día y gracias a muchos aportes de permacultores, alrededor del mundo y de la evolución que esta tuvo por parte de sus creadores, podemos definirla como: “Un sistema de diseño el cual aplica éticas y principios ecológicos en la planeación, diseño, desarrollo, mantenimiento, organización y preservación de espacios aptos para sostener la vida en el presente y el futuro”. Es importante destacar que existen muchas definiciones de la Permacultura ya que es adaptable a distintas culturas y cosmovisiones. Puede decirse que la Permacultura tiene un número determinado de principios (Esquema 3), entre ellos se encuentran: el cuidado de la tierra; el cuidado de las personas y el compartir los recursos con equidad.



Esquema 3. Éticas y Principios de la permacultura.

Luego tenemos los principios, en este caso los de Bill Mollison [13], los mismos se dividen en categorías, quizás los más llamativos sean los “Principios de Actitud”, estos son por ejemplo: “El problema es la solución”, “El desperdicio es una ilusión”, “Mínimo esfuerzo, máximo rendimiento”, “Ir con la naturaleza y no en su contra” y “Empieza pequeño”, como para nombrar algunos. Luego tenemos principios de diseño como: “Elementos multifuncionales”, “Planificar por zonas y sectores”, “Ubicación relativa de los elementos” y, por último, tenemos los principios ecológicos: “Aumentar el borde”, “Acelerar la sucesión y la evolución”, “Recursos biológicos”, entre otros. Los campos de acción de la permacultura son muy amplios, ya que al ser un sistema de diseño, tiene la capacidad de ser trabajada desde el individuo hasta el logro de diseños de sociedades enteras y que las mismas puedan perdurar en el tiempo, sin dañar sus ecosistemas, al mismo tiempo que logren grandes beneficios socioeconómicos.

Perspectivas

Puede decirse que la química verde examina los tres principales segmentos del mercado de la química tradicional: la minimización de residuos en los procesos químicos sintéticos convencionales, el reemplazo de productos químicos tradicionales por verdes y el uso de materias primas renovables para producir productos químicos y materiales con huellas ambientales más pequeñas que las producidas por los procesos actuales. Vale considerar que en los últimos años hubo una especial actividad en el desarrollo de materias primas renovables para una variedad de procesos químicos. En comparación con las materias primas derivadas del petróleo, estos nuevos materiales ofrecen toxicidad reducida y las emisiones de gases de efecto invernadero disminuidas y hasta eliminadas. Aunque esto ha ocurrido en nuestro país, la elección de productos ecológicos por lo general implica un pago más alto, en el mercado de consumo, por la implementación de procesos verdes en comparación con los tradicionales.

La mayoría de las materias primas renovables se producen a través de procesos biológicos o procesos térmicos y químicos aplicados a los materiales celulósicos, como la madera, residuos agrícolas o plantas no comestibles como el pasto, los cuales son menos costosos que la compra de productos derivados del petróleo. Cabe esperar que el uso de la química verde en las actividades industriales crezca rápidamente en la próxima década, así como los ahorros indirectos en la forma de evitar la responsabilidad por los impactos ambientales y sociales. Y ofreciendo un ahorro significativo de impuestos directos a los segmentos de la industria química que se convierta en procesos con diseños verdes.

En nuestra opinión sobre el nivel de conocimiento, formación educativa a nivel técnico-científico, e implementación de los principios de la química verde y criterios a nivel local, las tendencias que se vislumbran a corto/mediano plazo, como se explicó en los párrafos anteriores, se verán en las luces y sombras de una industria química que se moverá en diferentes líneas de acción, acertando estrategias así como buscando nuevas tendencias.

Referencias

- [1] R. Ballini en *Eco-friendly synthesis of fine chemicals*, J.H. Clark, G.A. Kraus (Eds.). The Royal Society of Chemistry, Cambridge, England (2009).
- [2] R.A. Sheldon, I. Arends y U. Hanefeld en *Green Chemistry and catalysis*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2007).
- [3] P.T. Anastas, M.M. Kirchoff; *Acc. Chem. Res.* 35 (2002) 686-694.
- [4] B. Trost; *Science* 254 (1991) 1471-1477.
- [5] R.A. Sheldon; *Green Chem.* 9 (2007) 1273-1283.
- [6] R.J. Farrauto, R.M. Heck; *Catal. Today* 55 (2000) 179-187.
- [7] P.T. Anastas, J.C. Warner en *Green Chemistry: theory and practice*, Ed. S. Publications, Oxford University Press, New York, U.S.A. (1998).
- [8] P.T. Anastas, J.B. Zimmerman; *Env. Sci. & Tech.* 37 (2003), 94A-101A.
- [9] A.G. Correa, V.G. Zuin; *Serie de textos de la escuela de verano en química V. Química verde: fundamentos y aplicaciones*. Universidad Federal de São Carlos, São Carlos – Brasil (2010).
- [10] <http://www.epa.gov/greenchemistry/pubs/pgcc/winners/gspa06.html>.
- [11] C.S. Shultz, S.W. Krska; *Acc. Chem. Res.* 40 (2007)1320-1326.
- [12] S.K. Ritter; *Chem. Eng. News* 84 (2006) 24-27.
- [13] <http://www.holmgren.com.au>.