

## ARTÍCULO ORIGINAL

---

### Catálisis para un mundo sostenible Catalysis for a sustainable world

Arturo Romero Salvador\*

Académico de Número de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España  
[aromeros@ucm.es](mailto:aromeros@ucm.es)

Aurora Santos López\*\*

Académica Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España  
[aursan@ucm.es](mailto:aursan@ucm.es)

#### RESUMEN

La preocupación- individual, colectiva e institucional- por el medioambiente, arrastrada por la secuencia de procesos de degradación en las más variadas formas y en los lugares más diversos del planeta, se ha ido reforzando y consolidando desde finales del siglo XX. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 para realizar un llamamiento universal a poner fin a la pobreza y proteger el planeta. Uno de los principales instrumentos para alcanzar la sostenibilidad es la aplicación de un modelo de economía circular, que sustituya al de economía lineal, y evite el crecimiento ilimitado de residuos. En este marco de transición hacia la sostenibilidad, la química tiene un papel fundamental en el abastecimiento de materiales y de energía. Los doce principios de la química verde o sostenible constituyen la herramienta para lograr productos y procesos medioambientalmente benignos. Un principio clave es el empleo de catalizadores en lugar de reactivos estequiométricos. Los catalizadores se perciben como sinónimo de química verde porque evitan la generación de residuos y facilitan reacciones y procesos con nuevas materias primas.

**PALABRAS CLAVE:** sostenibilidad, química verde, catálisis, medioambiente, residuos.

#### ABSTRACT

The concern -individual, collective, and institutional- for the environment, driven by the sequence of degradation processes in various forms and diverse locations around the planet, has been strengthening and consolidating since the late 20th century. The Sustainable Development Goals were adopted by the United Nations in 2015 to make a universal call to end poverty and protect the planet. One of the key instruments for achieving sustainability is applying a circular economy model, replacing the linear economy and preventing the unlimited growth of waste. In this transition towards sustainability, chemistry plays a crucial role in the supply of materials and energy.

The twelve principles of green or sustainable chemistry constitute the tool for achieving environmentally benign products and processes. A fundamental principle is the use of catalysts instead of stoichiometric reagents. Catalysts are perceived as synonymous with green chemistry because they prevent waste generation and facilitate reactions and processes with new raw materials.

**KEYWORDS:** sustainability, green chemistry, catalysis, environment, waste

---

\* Profesor Emérito de la Universidad Complutense de Madrid.

\*\* Catedrática de Ingeniería Química de la Universidad Complutense de Madrid

## 1.- INTRODUCCIÓN

---

Desde que los seres humanos comienzan a poblar la Tierra, se produce una lucha por sobrevivir en las condiciones, adversas en la mayor parte de los casos, que le plantea el ambiente. Pero esta lucha no va dirigida solamente en la dirección de adaptarse a las condiciones del medio, como ocurre con el resto de las especies, sino que se utilizan las habilidades tecnológicas de las que están dotados los seres humanos para tratar de adaptar el medio a sus necesidades y deseos. En su afán de superar obstáculos, los hombres han caminado en la dirección que marca el progreso tecnológico, con especial incidencia en los métodos capaces de adaptar la naturaleza a sus fines. Las continuas modificaciones que este modo de progresar ha introducido en los espacios naturales han sido poco significativas hasta tiempos muy recientes. Por ello, puede considerarse que durante la mayor parte de la historia de la humanidad ha existido un equilibrio razonable entre las limitaciones que la naturaleza imponía a los seres humanos y las modificaciones que éstos realizaban sobre ella. El equilibrio comienza a romperse a partir de la denominada Primera Revolución Industrial, en la que se inician las grandes producciones, el empleo sistemático de máquinas o los grandes consumos de materias primas y de energía, lanzando al ambiente todo aquello que carece de valor, sin más limitaciones que las del mercado: producir y vender, cuanto más mejor.

El desarrollo basado en el productivismo lleva aparejadas una serie de consecuencias negativas que van desde los aspectos ambientales hasta los sociales. No es extraño que al comienzo de la segunda mitad del siglo XX aparecieran personas y organizaciones que cuestionaran este modelo, seguido y desarrollado con un éxito sin precedentes desde el siglo XVIII. Los movimientos ecologistas son los primeros en dar la voz de alarma sobre el deterioro que se está produciendo en muchas partes del mundo, deterioro que tiene implicaciones negativas sobre el medio en general y sobre la salud humana en particular. También son importantes las opiniones sobre el efecto negativo para las generaciones futuras; el sistema de producción no tiene en cuenta que los recursos que utiliza son limitados y por tanto son bienes que se agotan.

La creciente capacidad que tiene la especie humana para modificar la Naturaleza trae como consecuencia que, el equilibrio mantenido durante muchos años se vaya desplazando paulatinamente hacia nuevas posiciones cuyos efectos, para las actuales y futuras generaciones, son desconocidos.

Desde las últimas décadas del siglo XX se está produciendo un cambio cultural, caracterizado por una modificación en la jerarquía de valores, entre ellos los ambientales, que sirvió para configurar nuestro mundo industrial y que estableció las reglas que debía seguir en el futuro

A partir del informe de la Comisión Brundtland (WCED, S.W.S.1987), los conceptos de sostenibilidad y desarrollo sostenible se han asumido, por parte de las principales instituciones internacionales, como una de las grandes aspiraciones de las Naciones Unidas. El proceso hacia el desarrollo sostenible debe armonizar elementos sociales, económicos y ambientales con el fin de mejorar la calidad de vida de nuestras sociedades, sin poner en peligro la de las generaciones futuras. Su consecución depende de la capacidad de combinar una economía competitiva con una menor degradación ambiental y una mayor eficiencia social en la gestión de los recursos.

En la tarea del hombre para adaptar la naturaleza a sus fines aparecen transformaciones de diferentes tipos y categorías. Cuando es necesario modificar la composición de los materiales disponibles, se está modificando su naturaleza íntima, es decir, se está aplicando la química.

## 2.- SOSTENIBILIDAD EN QUÍMICA

---

El papel recuperador y regenerador que los ecosistemas ejercen con los materiales que utilizan contrasta con la abundancia y acumulación de residuos que caracterizan a los tecnosistemas humanos. Además, los problemas se resuelven en demasiados casos fabricando sustancias que pueden provocar efectos negativos sobre la salud humana y el medioambiente, porque son tóxicas, persistentes y bioacumulables. No es extraño que la preocupación- individual, colectiva e institucional- por el medioambiente se haya ido reforzando y consolidando, arrastrada por la secuencia de procesos de degradación en las más variadas formas y en los lugares más diversos del planeta.

La química es una ciencia clave para resolver problemas materiales como alimentación, vestido, vivienda, sistemas de información, movilidad, ocio o salud. Con la introducción de métodos cuantitativos para estudiar las reacciones y el descubrimiento de las leyes que regulan su sentido y su velocidad, se fueron desarrollando técnicas y procedimientos que permitían sintetizar sustancias con las que sustituir con ventaja a los productos procedentes de la naturaleza. Comenzó la fabricación de una gran variedad de sustancias de manera eficiente y económica que hicieron realidad bastantes sueños que la humanidad había mantenido vigentes durante muchos años. Esta aportación que ha realizado la industria química sigue siendo imprescindible para resolver las carencias actuales y para hacer frente a las amenazas del futuro.

A medida que entraban en funcionamiento procesos químicos destinados a fabricar nuevos productos, iban apareciendo diferentes problemas relacionados con el ambiente. Unas veces estos problemas se manifestaban en forma de subproductos que acompañaban al producto objeto de fabricación, en acumulaciones de residuos sólidos abandonados en los

lugares más inesperados o en las emisiones de sustancias contaminantes al aire y al agua, cuyos efectos se manifestaban en los organismos vivos. En otras ocasiones, fueron sus propios productos finales los que ocasionaron, durante su etapa de aplicación o por medio de las sustancias formadas en su degradación, daños a la salud o provocaron el deterioro del ambiente.

La tarea actual de la química sigue siendo la misma que en sus inicios: buscar nuevos productos y mejores métodos de fabricación industrial para asegurar la alimentación y la salud, hacer más fácil y agradable la vida de los hombres, más efectivo su trabajo y preservar el medio y recursos que la naturaleza pone a nuestro alcance.

### 2.1. Química verde y sostenible

La química verde se definió inicialmente como el arte de incorporar consideraciones ambientales en el diseño de las moléculas, de las reacciones y de los procesos para evitar generar residuos tóxicos y la contaminación asociada. Los principios de la química verde fueron formulados por Paul Anastas y John Warner en su libro "Green Chemistry: Theory and Practice" (Anastas, P.T. 1998). Desde entonces, los 12 principios fueron adoptados como concepto de química verde porque su aplicación, desde el proceso de innovación, permite reducir el impacto de las actividades químicas y, además, conduce a nuevas tecnologías basadas en recursos más renovables, menor consumo de materias primas y menor impacto ambiental.

Sin embargo, el concepto de química sostenible es más amplio que el de química verde puesto que a los aspectos ambientales se deben incorporar los aspectos sociales y económicos.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Globales (Naciones Unidas, 2015), fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad. Los 17 ODS están acoplados, es decir, la acción en un área afecta a los resultados en otras áreas, por lo que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental.

En la figura 1 se representan las interacciones de los tres elementos, economía, medioambiente y sociología, que hacen que un proceso sea sostenible. La interacción de la economía con la ecología puede abordarse aplicando los 12 principios de la química verde, pero es necesario incorporar principios sociales para considerar los tres elementos. 6

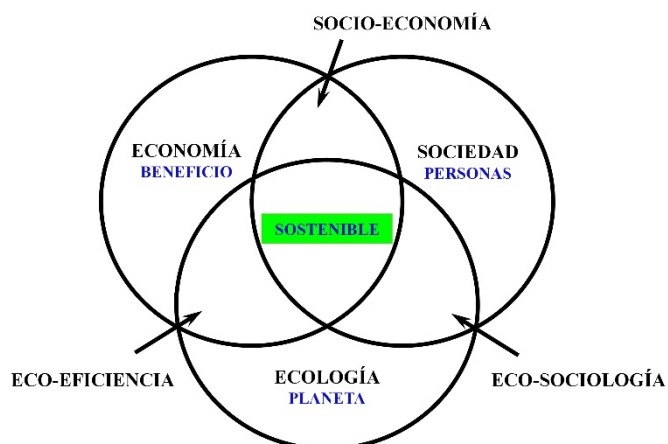


Figura1. Elementos e interacciones que configuran la sostenibilidad

Con el fin de que las nuevas tecnologías, además de eliminar las consecuencias negativas para el medio, contribuyan activamente a resolver los desafíos sociales, Asveld propone incorporar tres nuevos principios a los 12 de la química verde, (Asveld, L. 2019), enunciados así:

P.13. Garantizar que los beneficios asociados con un proceso de producción química se distribuyan de manera justa y equitativa a lo largo de toda la cadena de valor.

P14. Siempre que sea posible, el diseño del proceso de producción química debe tener en cuenta los valores e intereses de una amplia gama de partes interesadas.

P15. Los productos de química verde y sostenible deberían contribuir, al menos, a uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

Por tanto, se puede definir la química sostenible como un sistema de desarrollo de sustancias químicas en el que se aplica una química más segura y respetuosa con el medio ambiente para abordar la preocupación asociada con los impactos económicos y sociales de las sustancias químicas durante todo su ciclo de vida (Marion, P. 2017). La química sostenible, que abarca una variedad de campos que incluyen el agua, la energía, los alimentos, el clima y la población, debe desempeñar un papel importante en la salud humana, en el bienestar de las especies vivas y en la conservación del planeta.

## 2.2. Economía circular y química

En el actual modelo lineal de producción, economía lineal, las empresas extraen materiales, aplican energía y mano de obra para fabricar un producto y venderlo a un consumidor final, quien luego lo descarta cuando ya no cumple con su propósito. Este proceso se basa en “capturar-crear-descartar”. El nuevo modelo de producción, economía circular, pretende aumentar la eficiencia en el uso de los recursos para favorecer un desarrollo más sostenible y una sociedad en armonía con la naturaleza.

Según la última edición del Informe sobre la brecha de circularidad (CGRI, 2023), solo alrededor del 30% de las materias primas se transforman en productos útiles. La gran mayoría de esta pérdida son residuos que se emiten y dispersan en el medioambiente. La creciente extracción de materiales ha reducido la circularidad global: del 9,1 en 2018, al 8,6% en 2020 y el 7,2% en 2023. Esto significa que más del 90% de los materiales se desperdician, se pierden o no están disponibles durante años, ya que quedan inmovilizados en construcciones duraderas, edificios, maquinaria, etc. Los materiales que regresan a la economía global, después del final de su vida útil, conocidos como materiales secundarios, representan el 7,2% de los insumos de materiales a la economía. Es decir, el mundo depende casi exclusivamente de materiales nuevos (materiales vírgenes).

El sector químico es un elemento esencial para una economía circular sostenible. La química ayuda a optimizar el uso de las materias primas transformando residuos y subproductos en materias primas nuevas o secundarias. Estas materias primas se pueden utilizar para la obtención de los productos químicos y materiales destinados a la fabricación de productos de consumo. Por tanto, la química debe evolucionar desde la ciencia y la industria transformadora (economía lineal) hasta la ciencia y la industria recicladora (economía circular). Esta transformación del modelo de producción implica un cambio profundo en la concepción de las moléculas y en el diseño de los procesos para asegurar la duración, reutilización y reciclabilidad. Se puede colocar a la química en el centro de la economía circular.

### 3.- CATALIZADORES

---

En las sociedades actuales, casi todos los procesos en que tienen lugar reacciones químicas, particularmente en el tratamiento, obtención o destrucción de productos orgánicos, se basan en procesos catalíticos. La catálisis desempeña un papel crucial en el desarrollo económico sostenible. Al menos un proceso catalítico está involucrado en casi todas las áreas importantes de la industria química: síntesis de sustancias químicas y materiales, producción y conversión de energía, reducción de la contaminación y protección del medio ambiente.

Los catalizadores se emplean para facilitar la conversión de las materias primas a productos, para reducir los requerimientos energéticos y para disminuir la formación de subproductos ocasionada por la ineficiencia de la transformación.

La transformación de los reactivos en los productos mediante catalizadores es el resultado de un conjunto de etapas, como la interacción de las moléculas con los centros donde reside la actividad catalítica, el transporte de fluidos hasta llegar a ellos o las reacciones que modifican su composición o estructura. La función de los centros catalíticos es reunir y acomodar los reactantes para que su transformación en productos de reacción se produzca a mayor

velocidad. En este proceso se debe lograr la regeneración del lugar que ha participado como catalizador para que quede disponible, una vez que se ha realizado la liberación del producto, y se realice la conversión de otra molécula. Cada evento catalítico está formado por un conjunto de etapas elementales que se inicia con la intervención de los centros activos y finaliza con su regeneración.

Cuanto mayor sea la capacidad del catalizador para realizar este ciclo en el menor tiempo posible, mayor será la velocidad a la que se produce la reacción (Actividad catalítica).

Si el catalizador es capaz de realizar el ciclo de etapas elementales por varias rutas, las moléculas de reactivo no se transforman siempre en el producto deseado, sino que junto a él aparecen otros compuestos químicos diferentes denominados subproductos. Este comportamiento es responsable de la disminución del rendimiento de las operaciones (Selectividad catalítica) y plantea el problema de la separación de los productos secundarios y de su posterior tratamiento.

Cuando se produce alguna modificación del centro activo durante el evento catalítico, el catalizador pierde parte de su capacidad para seguir transformando las moléculas de reactivo. (Vida del catalizador).

Con procesos catalíticos se lograron importantes éxitos en la fabricación eficiente de productos básicos (primero inorgánicos, como ácido sulfúrico, amoníaco y ácido nítrico, y después, derivados del petróleo, como los obtenidos mediante craqueo catalítico, oxidación de aromáticos, alquilación, isomerización, oxiclорación, etc.). Sin embargo, la aplicación de los catalizadores a procesos de la industria farmacéutica y de química fina ha sido mucho más tardía y es precisamente en ellas, donde se producen más residuos.

La catálisis aparece como uno de los doce principios de química verde (Principio 9. Potenciación de la catálisis) y, además, su empleo para realizar la transformación química tiene una gran incidencia en la mayor parte del resto de principios. Analizando los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible, los catalizadores son imprescindibles para conseguir: Obj.6. Agua limpia y saneamiento. Obj.7. Energía asequible y no contaminante. Obj.9. Industria, innovación e infraestructura. Obj.13. Acción por el clima.

Mediante tecnologías basadas en el empleo de catalizadores, como la fabricación verde, biorrefinerías o biocombustibles, se pretende prevenir el impacto ambiental y conservar los recursos naturales en distintas actividades que realiza el sector químico. Con ellas, tecnologías de prevención, se da respuesta a la necesidad de conservar los recursos naturales no renovables para obtener energía y materias primas para la industria química. Obj.7 y Obj.9.



El tratamiento y control de contaminantes antropogénicos y naturales en todas las esferas ambientales es objetivo de las tecnologías de corrección. Mantener el aire, el agua y el suelo limpios es una actividad que ha aumentado en extensión y complejidad a medida que las poblaciones crecen, las economías prosperan y las necesidades sociales cambian. La creciente carga de una gama cada vez más diversa de contaminantes orgánicos e inorgánicos requiere tecnologías catalíticas con capacidad de adaptarse a los distintos problemas que es preciso resolver. El saneamiento deficiente y la contaminación ambiental tienen efectos perjudiciales para la salud y los ecosistemas. Obj.6 y Obj.13.

### 3.1. Tecnologías de prevención

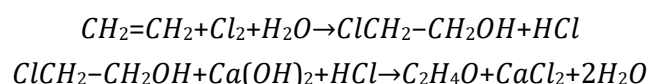
#### 3.1.1. Sustitución de procesos estequiométricos

Una fuente importante de residuos, particularmente en las industrias de química fina y farmacéutica, es el uso de reactivos estequiométricos en la síntesis de compuestos orgánicos. Oxidaciones estequiométricas con reactivos de cromo (VI), permanganato y manganeso, reducciones con hidruros metálicos y metales o el empleo de ácidos minerales y ácidos de Lewis en una amplia variedad de reacciones como alquilaciones y acilaciones, son las principales fuentes de residuos en muchas reacciones orgánicas.

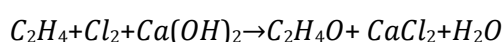
La minimización de residuos en este tipo de procesos de fabricación se ha conseguido cambiando las primitivas metodologías estequiométricas por rutas catalíticas capaces de efectuar reacciones basadas en la economía atómica. Por ejemplo, utilizar oxígeno o peróxido de hidrógeno como agente oxidante, hidrógeno como reductor o monóxido de carbono como reactivo de carbonilación o hidroformilación.

Un ejemplo clásico que ilustra la diferencia de la Utilización Atómica, parámetro que permite cuantificar la producción de residuos de un proceso químico, es la fabricación de óxido de etileno. El etilenglicol es un producto que se utiliza para fabricar el poliéster conocido como PET y se emplea como anticongelante, insecticida y para esterilizar equipos médicos.

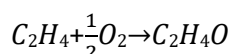
Inicialmente se obtenía por un proceso estequiométrico a partir de etileno, cloro e hidróxido de calcio, según las reacciones:



siendo la reacción global:



En el caso de la ruta catalítica, la reacción corresponde a:





Utilizando la ruta estequiométrica se necesitan 173 gramos de reactivos para obtener 44 gramos de óxido de etileno, obteniéndose 111 gramos de cloruro de calcio y 18 de agua. Por tanto, la Utilización Atómica de esta ruta es del 25% (44/173). El 75% de los átomos puestos en juego acaban formando parte de otros productos, subproductos de la reacción.

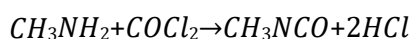
La ruta catalítica tiene una Utilización Atómica del 100% porque para obtener 44 gramos de óxido de etileno se necesitan de 28 gramos de etileno y 16 de oxígeno. En la práctica, cuando se lleva a cabo esta reacción se encuentra que aparecen reacciones secundarias como la combustión completa a dióxido de carbono haciendo que parte del etileno no acabe formando parte del óxido de etileno lo que hace que la Utilización Atómica Efectiva no sea del 100% pero todavía muy superior a la de la ruta estequiométrica. La selectividad de la reacción depende de la capacidad del catalizador para favorecer el camino deseado y dificultar el que conduce a productos secundarios. Por tanto, una vez seleccionada la ruta que permite conseguir un elevado valor de la Utilización Atómica es preciso encontrar el catalizador que logre la máxima especificidad.

### 3.1.2. Sustitución de sustancias peligrosas

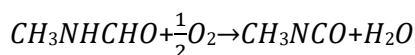
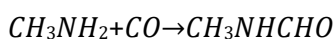
Con bastante frecuencia, tanto la industria química como la petroquímica han utilizado productos químicos peligrosos para realizar las transformaciones. El accidente de Bhopal es un ejemplo de las consecuencias que pueden derivarse de emplear sustancias químicas peligrosos en la fabricación de productos. En diciembre de 1984 se produjo una fuga al aire inicialmente se supuso que, de fosgeno, pero después de confirmó que fue de isocianato de metilo- en una fábrica de plaguicidas, ocasionando más de 25.000 muertos y 500000 heridos. La hipótesis más probable considera que el accidente se produjo por realizar el mantenimiento y las tareas de limpieza de la planta de forma inadecuada (Varma, R. 2005). Está considerado como uno de los peores desastres de la industria química a nivel mundial.

Este accidente fue un impulso, entre otras muchas medidas tomadas por la industria química, para reducir el empleo de sustancias peligrosas en los métodos de síntesis, reducción que puede ilustrarse con los siguientes ejemplos:

- En la manufactura de productos químicos agrícolas se utiliza como reactivo intermedio metilisocianato. Este compuesto se obtiene por reacción entre metilamina y fosgeno:



La síntesis de metilisocianato puede realizarse sin emplear fosgeno recurriendo a un proceso alternativo como:



que puede efectuarse si se dispone de un catalizador apropiado para efectuar la deshidrogenación oxidativa.

- Mediante la alquilación se transforman los gases ligeros de refinería en los combustibles líquidos que demandan distintos tipos de motores. El catalizador convencional para llevar a cabo la reacción entre olefinas y obtener hidrocarburos ramificados es fluoruro de hidrógeno, HF. La sustitución de HF, compuesto, como las zeolitas, que permiten conducir estas reacciones de forma similar, es decir con velocidades de reacción razonables y selectividades similares.

### 3.1.3. Empleo de nuevas materias primas

Uno de los grandes desafíos que la tecnología debe afrontar es la transición de una economía insostenible, basada en recursos fósiles, a una economía sostenible y neutra en carbono, basada en el uso de materias primas renovables o procedentes de residuos. Este cambio de modelo está impulsado por la necesidad de conservar los recursos para las generaciones futuras y de mitigar, reduciendo las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, el calentamiento global antropogénico.

En un mundo que no utilice recursos fósiles, las únicas fuentes de carbono son la biomasa y el dióxido de carbono. La mayor parte de la biomasa está compuesta por una mezcla de componentes mayoritarios bastante bien definidos como celulosa, hemicelulosa, almidón e inulina, quitina y lignina. Además, contiene productos minoritarios como proteínas, grasas, ceras, ácidos orgánicos, minerales y azúcares libres.

En una refinería petroquímica, los principales productos son olefinas de bajo peso molecular (etileno, propileno, butenos) y aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos), junto con monóxido de carbono e hidrógeno. Los hidrocarburos, gases o líquidos hidrofóbicos, se convierten, con tecnologías catalíticas, generalmente en sistemas libres de solventes, en una gran variedad de productos químicos básicos.

Como los constituyentes de la biomasa son las materias primas de la biorrefinería, su transformación en biocombustibles y productos químicos básicos necesita procesos diferentes a los involucrados en una refinería petroquímica. Una transición de una industria química basada en combustibles fósiles, a una industria química basada en biomasa renovable, significa un cambio de los procesos que emplean hidrocarburos como materia prima, a otros procesos que permitan obtener los productos a partir de los componentes de la materia vegetal. La complejidad y variedad de los compuestos de la biomasa y la costosa purificación de los productos de reacción de la biomasa es la causa que dificulta el empleo de los catalizadores desarrollados por la industria petrolera.

Para prevenir las consecuencias del calentamiento global, se recomienda que las emisiones netas de CO<sub>2</sub> se reduzcan a cero hacia 2050. Entre las opciones viables para lograrlo se encuentra la captura y almacenamiento de dióxido de carbono, o su empleo en distintas aplicaciones.

La estabilidad de la molécula de CO<sub>2</sub> constituye una gran dificultad para utilizarlo como materia prima con la que sintetizar productos químicos. Por ello, el desarrollo de procesos viables económicamente debe superar dos importantes barreras. Por un lado, es necesario un elevado aporte energético para la transformación. La energía debe proceder de fuentes neutras en carbono, evitando emisiones de este gas de efecto invernadero como consecuencia del proceso. Por otro, los reactores deben operar a elevadas temperaturas/presiones para lograr que la molécula sea menos estable y emplear catalizadores capaces de reducir la energía de activación del proceso.

Aunque la utilización de CO<sub>2</sub>, mediante su conversión en productos de interés industrial, presenta grandes desafíos, su potencial para contribuir a la mitigación del cambio climático y, al mismo tiempo, convertir las emisiones residuales de CO<sub>2</sub> en materia prima, es una poderosa fuerza impulsora.

Mediante el reformado de metano con dióxido de carbono se obtiene “gas de síntesis” (mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno). El principal objetivo de la hidrogenación directa de CO<sub>2</sub> es la obtención de productos de un átomo de carbono, como monóxido de carbono, metano, metanol y ácido fórmico. La síntesis de compuestos con más átomos de carbono está limitada por la cinética de la reacción de acoplamiento carbono-carbono. Otros procesos de valorización de dióxido de carbono para obtener productos orgánicos se basan en su reacción con un carbanión. Mediante la carboxilación se pueden obtener carbonatos orgánicos, ureas, carbamatos y polímeros. La viabilidad técnica y económica de todos estos procesos depende de los catalizadores y de la fuente de energía empleada en estas transformaciones.

La fotosíntesis artificial es un proceso electroquímico en el que la energía necesaria procede de la luz solar que se absorbe mediante fotocatalizadores. La reducción electroquímica pretende convertir el CO<sub>2</sub> en productos químicos y en combustibles, usando energía eléctrica mediante una celda electrolítica. En el ánodo se produce la oxidación del agua y se desprende oxígeno. En el cátodo tiene lugar la reducción de CO<sub>2</sub> para formar los compuestos orgánicos.

Todos los procesos de conversión de dióxido de carbono requieren un aporte energético considerable. Aunque un mayor aporte de energía (calor, luz, electricidad) permite conseguir aumentos en la conversión de CO<sub>2</sub> y en el rendimiento del producto, también es responsable del aumento del coste y, dependiendo del tipo de energía utilizada, de nuevas emisiones. Disminuir la energía de activación de estas reacciones es misión de los catalizadores.

En principio, con las distintas tecnologías de transformación de dióxido de carbono se puede, además de mitigar su emisión a la atmósfera, obtener una amplia gama de productos químicos y combustibles. Sin embargo, es preciso superar varios desafíos (actividad, selectividad, resistencia a la desactivación, consumo de energía y coste) que dificultan su comercialización.

Lograr una conversión elevada sigue siendo un reto para la mayoría de las tecnologías debido a la estabilidad termodinámica de los enlaces carbono-oxígeno y a la rápida desactivación del catalizador. Es preciso encontrar catalizadores más activos y estables, y, además, que puedan operar en condiciones más suaves.

### 3.1.4. Obtención de energía más limpia

El hidrógeno puede utilizarse para obtener energía, eléctrica o térmica, mediante pilas de combustible, motores de combustión interna, quemadores, calderas, etc. Tiene una densidad energética elevada ( $\approx 143 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) y sólo libera agua como subproducto. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno se obtienen a partir de combustibles fósiles, principalmente por reformado de metano con vapor de agua. Para que este vector energético sea independiente de los combustibles fósiles, debe obtenerse a partir de otras materias primas.

La producción de hidrógeno por ruptura electroquímica de la molécula agua es una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente, con una huella de carbono prácticamente nula. Esta tecnología utiliza corriente eléctrica para generar el hidrógeno y el oxígeno a partir de agua mediante electrolizadores. Si la electricidad procede de fuentes renovables, se obtiene hidrógeno sin emitir dióxido de carbono a la atmósfera, figura 2.

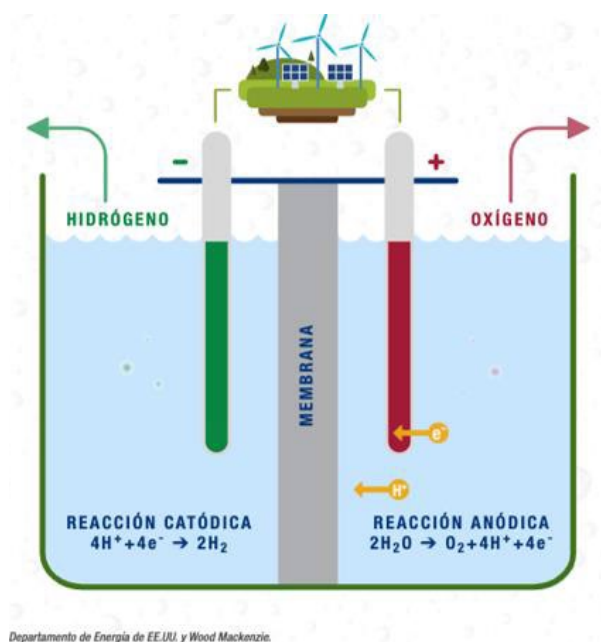


Figura 2. Esquema de un electrolizador que funciona con energía renovable.

Fuente: Departamento de Energía de EE.UU.

Un electrolizador es un dispositivo capaz de separar los átomos de hidrógeno y de oxígeno que forman la molécula de agua mediante un proceso denominado electrolisis. Como los enlaces entre estos dos elementos son muy fuertes, su ruptura requiere el aporte de energía eléctrica. A los electrodos, ánodo y cátodo, que están separados por una membrana, se aplica un voltaje elevado provocando una corriente eléctrica en el agua, a la que se añade un electrolito, que da lugar a la transformación en sus componentes.

Disponer de electrolizadores eficientes es clave para que el hidrógeno procedente de la electrolisis del agua pueda usarse como materia prima de la industria y para obtener energía eléctrica mediante pilas de combustible. Existen diferentes tipos de electrolizadores dependiendo del electrolito utilizado y de la distancia entre los electrodos y la membrana. Estos equipos disponen de catalizadores apropiados para aumentar la velocidad de reacción en los electrodos y disminuir el consumo energético que requiere la transformación de agua en hidrógeno y oxígeno.

El uso de electrolizadores con membrana de intercambio aniónico es muy atractivo porque pueden utilizar catalizadores metálicos abundantes y baratos, como Ni y Fe, debido a que el entorno alcalino no es excesivamente corrosivo. En cambio, los electrolizadores con membrana de intercambio de protones requieren catalizadores metálicos escasos y costosos, como platino o iridio (Faqeeh, A. H. 2023). El diseño racional de electrolizadores estables, con alta actividad hacia la reacción de desprendimiento de hidrógeno (HER) y hacia la reacción de desprendimiento de oxígeno (OER), sigue siendo un aspecto crítico en la electrolisis de agua debido a la baja velocidad a que tienen lugar las reacciones en los electrodos (especialmente la OER); lentitud que es responsable del elevado requerimiento de sobrepotencial (exceso sobre el termodinámico).

### **3.2. Tecnologías de corrección: emisiones y vertidos**

La publicación de “Silent Spring” en 1962 por Rachel Carson (Carson, R. 1962) provocó un gran impacto en la sociedad americana. Tras la crisis del petróleo de los años 70 aparecen leyes de control de la actividad industrial que exigen, entre otras medidas, técnicas destinadas a evitar que los contaminantes alcancen el medio.

Este interés por la protección ambiental se ha traducido en el desarrollo y utilización de tecnologías destinadas a controlar la contaminación al final del proceso limitando vertidos y emisiones de contaminantes. Con la aplicación de estas tecnologías se logra mejorar la calidad del aire y del agua, ya que con su empleo se alcanza el objetivo de limitar la liberación de sustancias tóxicas.

### 3.2.1. Emisiones a la atmósfera

La demanda de calidad ambiental condujo al desarrollo de catalizadores para una finalidad muy diferente a la que habían tenido hasta entonces. La reducción de las emisiones de gases contaminantes, en fuentes fijas y móviles, se puede conseguir si se retiran de la corriente antes de que se liberen a la atmósfera. Algunos de estos compuestos, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y muchos compuestos orgánicos, pueden transformarse por medio de reacciones químicas en gases inocuos como nitrógeno, dióxido de carbono y agua.

A las dificultades que plantea la modificación de la velocidad de la propia reacción química se unen tres peculiaridades nuevas: la concentración de los contaminantes en las corrientes a tratar es muy pequeña, el número de compuestos presentes en la mezcla es elevado y el tratamiento de depuración debe aplicarse al final del proceso que los genera. Estas restricciones dieron lugar a la aparición de numerosos catalizadores de oxidación-reducción muy activos, capaces de adaptarse a las situaciones particulares de la emisión; y al desarrollo de las estructuras monolíticas que ofrecen una elevada superficie de contacto junto a una pérdida de carga despreciable. La catálisis ambiental de fin de línea ha ido creciendo a lo largo de dos décadas hasta ocupar el primer segmento en el mercado de catalizadores.

La figura 3 muestra un ejemplo de estas tecnologías de fin de línea que se emplea para depurar los gases emitidos en plantas de ácido nítrico. La instalación de un convertidor catalítico permite transformar los óxidos de nitrógeno, por reacción con amoníaco, en nitrógeno y agua, proceso conocido como reducción catalítica selectiva.

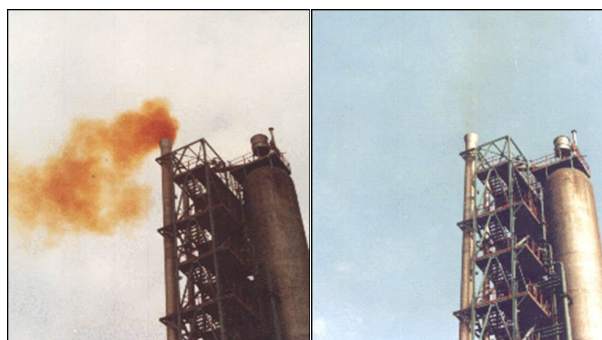


Figura 3. Emisiones de una planta de ácido nítrico antes (izquierda) y después (derecha) de la incorporación de un catalizador SCR

En los motores de combustión interna, Otto (gasolina) y Diesel, se forman subproductos no deseados tales como hidrocarburos sin quemar y monóxido de carbono, porque la combustión no es completa. Además, las impurezas del combustible dan lugar a emisiones de otros contaminantes como SO<sub>x</sub>, y la reacción del nitrógeno con el oxígeno del aire de combustión da lugar a la formación de NO<sub>x</sub>.



Un convertidor catalítico consta de un soporte cerámico, normalmente cordierita ( $2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$ ), cuya geometría es de panal de abeja o de canales cuadrados. Este soporte está recubierto de una capa (washcoat) de alúmina con una solución sólida de óxido de cerio y circonio que actúa como soporte catalítico de la fase activa. Esta fase está formada por metales nobles como platino, rodio, paladio y una serie de elementos como bario, lantano, níquel, etc. Para poder transformar los contaminantes debe funcionar en condiciones próximas a la estequiometría, mediante un regulador de la relación oxígeno/combustible, conocido como sonda lambda. En la figura 4 se muestra los principales componentes de un monolito de tres vías.

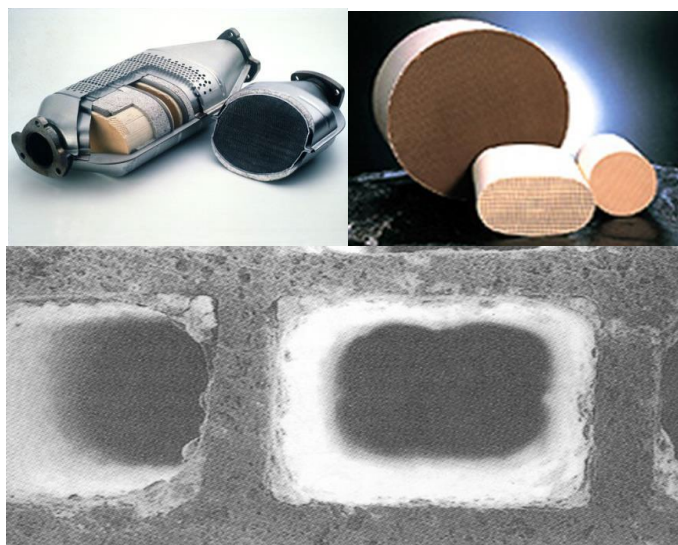


Figura 4. Catalizador para el tratamiento de los gases de escape en automóviles de gasolina. Configuración Monolítica y revestimiento catalítico del canal cerámico.

Los motores Diesel- utilizados en vehículos pesados para el transporte colectivo y de mercancías, y que se han extendido también a los vehículos ligeros- tienen características específicas que condicionan sus emisiones. Utilizan combustibles de alto peso molecular (hidrocarburos con un número de carbonos entre 9 y 20) cuyo contenido en azufre era elevado hace décadas pero que se ha ido reduciendo notablemente. Operan en condiciones pobres, es decir, con exceso de oxígeno, alcanzando una temperatura de los gases de escape del motor en torno a  $300^{\circ}\text{C}$ . Estas características hacen que el perfil de sus emisiones tenga diferencias significativas con respecto a las emisiones procedentes de los motores Otto.

La otra diferencia fundamental con los convertidores de tres vías es el procedimiento para transformar los óxidos de nitrógeno. Los gases de escape de los motores Diesel contienen exceso de oxígeno, atmósfera oxidante, por lo que debe emplearse un catalizador que sea capaz de descomponerlos en sus constituyentes, nitrógeno y oxígeno, o que sea capaz de llevar a cabo una reducción selectiva mediante un reactivo apropiado para que no se consuma con el oxígeno que contienen estos gases.



La reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno causadas por los escapes de los motores Diesel se realiza mediante un proceso de reducción catalítica selectiva (SCR) que utiliza urea como reductor. La forma de incorporar este reactivo a los gases a tratar es en forma de una disolución de urea de elevada pureza en agua desmineralizada (disolución al 32,5%).

### 3.2.2. Vertidos al agua

El agua es un compuesto esencial para la vida. En un mundo cada vez más poblado y urbanizado, la calidad y abastecimiento de agua es un pilar esencial para garantizar la calidad de vida de los ciudadanos. Un sistema de tratamiento y de transporte de agua bien planificado y mantenido es esencial, no solo para satisfacer las necesidades básicas de la población, sino también para el desarrollo económico e industrial y la sostenibilidad de las propias comunidades.

Se han vertido al medio ambiente una gran variedad de contaminantes orgánicos, como productos farmacéuticos y de cuidado personal, productos químicos perfluorados, insecticidas, fungicidas, microplásticos, etc. Muchos de ellos se caracterizan por ser altamente tóxicos y no biodegradables, lo que representa una enorme amenaza para la seguridad ambiental y la salud humana.

La eliminación de contaminantes orgánicos en agua se puede realizar aplicando tecnologías de separación por membranas, adsorción, degradación fotovoltáica y electroquímica o procesos avanzados de oxidación (AOPs). Esta última, propuesta por William H, Graze et al. en 1987 y desarrollada gradualmente en las siguientes décadas, se ha impuesto como una tecnología de vanguardia para el tratamiento de agua debido a su elevada eficiencia en la degradación de contaminantes orgánicos.

Estos procesos AOPs generan y utilizan, en condiciones ambientales, especies de oxígeno muy reactivas, como el radical hidroxilo o sulfato, para degradar y mineralizar contaminantes orgánicos a CO<sub>2</sub> y sales inorgánicas.

El proceso Fenton se basa en la descomposición del peróxido de hidrógeno catalizada por hierro, en condiciones ácidas, para generar los radicales hidroxilo, especie con un elevado potencial de oxidación. Diferentes catalizadores metálicos facilitan la descomposición del agua oxigenada y la generación del radical hidroxilo, pero la solubilidad y toxicidad de las especies metálicas limitan la aplicación de la catálisis homogénea.

Con catalizadores heterogéneos se pueden superar estas limitaciones. Sin embargo, la aplicación de la catálisis heterogénea, para oxidar contaminantes orgánicos en agua, depende de la estabilidad y de la reciclabilidad del catalizador. Otros procesos que pueden mejorar el

tratamiento de agua contaminada por oxidación con el radical hidroxilo son el electro-Fenton y foto-Fenton.

Las tecnologías AOPs basadas en la generación del radical sulfato tienen varias ventajas frente a los basados en el radical hidroxilo, como el mayor intervalo de pH para su aplicación, el manejo más fácil y seguro los oxidantes que generan estos radicales, la mayor estabilidad de estos oxidantes en el medio y la mayor versatilidad de los radicales sulfato frente a distintos tipos de contaminantes orgánicos (Wei, J. 2022). Para generar el radical sulfato se debe activar un oxidante adecuado, peroximonosulfato ( $\text{HSO}_5^-$ , PMS) o peroxidisulfato ( $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ , PDS), mediante reacciones producidas por transferencia de energía o de electrones.

Gracias al trabajo realizado con PMS, cuya estructura asimétrica hace más probable que su enlace O-O se rompa y produzca  $\text{SO}_4^-$ , se dispone de varios catalizadores heterogéneos para su activación, catalizadores constituidos principalmente por metales de transición (Fe/Co/Mn/Cu/Ce/Ni/Zn).

Actualmente los procesos avanzados de oxidación mediante el radical sulfato, (SR-AOP) están cobrando cada vez más importancia en el tratamiento de corrientes acuosas (industriales y subterráneas) que contienen contaminantes orgánicos persistentes.

#### 4. CONCLUSIÓN

---

La necesidad de conservar los recursos naturales no renovables, utilizados tanto para obtener energía como materias primas para la industria química, y la contaminación ambiental generada en esos procesos, se han convertido en dos importantes y difíciles problemas globales que es preciso abordar.

La Química Verde y Sostenible tiene como objetivo reducir o eliminar el impacto ambiental de las distintas actividades que realiza el sector químico, aportando los productos que demandan las sociedades actuales para satisfacer sus necesidades y, a la vez, disminuyendo progresivamente el daño que estas actividades pueden causar a los organismos vivos y al medio ambiente. Además, los nuevos procesos deben ser socialmente aceptados y económicamente viables. Las principales áreas que pretenden alcanzar este objetivo general son métodos de síntesis, procesos, tecnologías y fabricación verde, biorrefinerías y biocombustibles, energía renovable y almacenamiento de energía. Todas ellas requieren el empleo de catalizadores.

## 8.- BIBLIOGRAFÍA

---

- ANASTAS, P.T.; WARNER, J.C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press. New York
- ASVELD, L. (2019). Towards including social sustainability in green and sustainable chemistry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* **19**, 61-65
- BURCH, R. (2004). Knowledge and know how in emission control for mobile applications. *Catalysis Reviews* **46**, 271-334.
- CARSON, R. (1962). *Silent Spring*. Ed.: Houghton Mifflin. Boston
- CGRI (2023). The Circularity gap report. <https://www.circularity-gap.world/2023>
- FAQEEH, A. H., SYMES, M.D. (2023). A standard electrolyzer test cell design for evaluating catalysts and cell components for anion exchange membrane water electrolysis. *Electrochimica Acta* **444**, 142030-142035
- MARION, P., BERNELA, B., PICCIRILLI, A., ESTRINE, B., PATOUILLARD, N., GUILBOT, J. (2017). Sustainable chemistry: how to produce better and more from less? *Green Chem.*, **19**, 4973-4989
- Naciones Unidas (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para Desarrollo Sostenible. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015. A/RES/70/1
- VARMA, R., VARMA, D.R. (2005). The Bhopal Disaster of 1984. *Bulletin of Science, Technology & Society* **25**: 37-45.
- WCED, S. W. S. (1987). World commission on environment and development. Our common future, 17(1), 1-91. (Brundtland Report), United Nations
- WEI, J., LI, F., ZHOU, L., HAN, D., GONG, J. (2022). Strategies for enhancing peroxymonosulfate activation by heterogeneous metal-based catalysis: A review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **50**, 12-28