

## RADICALES (MUY) LIBRES



J. de Mendoza

Catedrático jubilado de Química Orgánica  
(Universidad Autónoma de Madrid)  
Profesor Emérito, Instituto Catalán  
de Investigación Química  
(ICIQ, Tarragona)  
C-e: [jmendoza@iciq.es](mailto:jmendoza@iciq.es)

*Verde que te quiero verde  
verde viento verdes ramas  
el barco sobre la mar  
el caballo en la montaña*

Estos primeros versos del cancionero de García Lorca (1928) o la película *How Green Was My Valley* de John Ford (1941) son muestras de que el color verde siempre ha estado de moda, y más ahora, cómo no, porque lo asimilamos a pureza y sostenibilidad, al color de los prados o a la salvación del planeta, aunque ya he dicho algunas veces que el planeta no necesita ni pide salvarse. De seguir haciendo tonterías, se acelerarán algunos cambios y en el equilibrio resultante probablemente nosotros no formaremos parte. Sin embargo, lo "verde" no siempre se asocia con algo positivo, baste recordar que decimos que alguien está verde cuando muestra poca madurez, por analogía con muchas frutas que cambian su color al madurar, como los plátanos o los tomates, aunque no todas lo hagan. Más allá de esas pequeñas contradicciones y divagaciones, el culto al verde sigue imparable, y a la cabeza están las grandes corporaciones, incluidas obviamente las energéticas y petroleras, con más ímpetu cuanto más culpables se sienten. Si pudieran, además de verdes praderas y paisajes idílicos, en su publicidad tal vez harían emanar de nuestros televisores vapores con olor a hierba recién segada.

Y con las "fuentes" de energía ocurre lo mismo, pasan a ser verdes cuando su generación o consumo no produce gases de efecto invernadero ni aumenta la huella de carbono, lo que sí ocurre con los combustibles fósiles. He entrecomillado la palabra fuentes para distinguirlas de simples "vectores" que transportan una energía generada desde otros orígenes. Es el caso de la electricidad y también del hidrógeno, objeto de esta crónica, ya que todo el que utilizamos actualmente necesita ser fabricado porque, según decíamos siempre, no tenemos hidrógeno libre en nuestro planeta, pues es tan reactivo que nadie jamás creyó que pudiera sobrevivir bajo la corteza terrestre, incluso a cierta profundidad. ¿O sí? Veremos más adelante que el hidrógeno natural existe entre nosotros en cantidades importantes, y es relativamente sencillo de extraer... ¡además de renovable! Antes de hablar de él,

## Los múltiples colores de un gas incoloro

y de otros colores con los que etiquetamos ese gas incoloro, recordemos algo de su química.

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, y en su forma molecular ( $H_2$ ) es considerado como el combustible ideal, pues sólo produce energía y agua tras reaccionar con el oxígeno. Al ser también el elemento más ligero del sistema periódico, contiene más energía por unidad de peso que cualquier otro combustible. La entalpía o calor de reacción de su reacción con oxígeno es de  $-285,87$  kJ/mol, pero la reacción inversa, es decir, la descomposición del agua para formar oxígeno e hidrógeno, que es lo que utilizamos para generarlo, requiere lógicamente el suministro de la misma cantidad de energía con el signo cambiado,  $+285,87$  kJ/mol. Sin embargo, si tenemos en cuenta que para romper el agua hay que vencer además una considerable energía de activación (aspectos cinéticos y no menores del problema), que requiere electrólisis, catalizadores, etc., el coste energético resulta mucho mayor que el beneficio. Por otra parte, el hidrógeno es un gas muy liviano y volátil, difícil de almacenar y de transportar, porque además de explosivo como el metano, y a diferencia del mismo, es muy reactivo y no puede transportarse por sus mismos gaseoductos pues los acabaría dañando. A pesar de los avances recientes en pilas de combustible, o en adsorción de gases encapsulados en estructuras químicas porosas complejas de diseñar y de preparar, los problemas de almacenamiento, manipulación y transporte del hidrógeno son también esenciales, y siguen lejos de estar resueltos.

Y vamos con los colores, asignados al hidrógeno según su modo de obtención. El hidrógeno negro o marrón procede de la gasificación del carbono, que emplea combustibles no renovables y emite dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Por su parte, se llama hidrógeno gris al resultante del reformado catalítico del carbono con vapor de agua y constituye el método más empleado hoy en día, si bien, como el negro, requiere de combustibles no renovables y emite también importantes cantidades de  $CO_2$  (unos 10 kg por cada kg de  $H_2$  producido). El azul es el que se forma a partir del metano, generando algo menos de dióxido de carbono que los anteriores. La eliminación de ese subproducto indeseable y de otras impurezas de los varios colores de nuestra paleta ya mencionados no sólo incrementa el precio sino que genera una importante huella de carbono. Existen

otros colores que no emiten  $\text{CO}_2$ , que incluyen por ejemplo el hidrógeno rosa, que emplea combustible nuclear para realizar la electrólisis del agua, o el turquesa, generado por pirólisis del metano, que produce carbono sólido como subproducto.

Llegamos así al hidrógeno verde, famoso porque no emite dióxido a la atmósfera, ya que emplea para la electrólisis del agua electricidad procedente de fuentes sostenibles, como energías eólica, hidroeléctrica, o solar fotovoltaica. Aunque todos los gobiernos predican su uso predominante en menos de 30 años, y aprueban gigantescos proyectos y gaseoductos con fondos internacionales para conseguirlo, actualmente sólo representa un tímido 2% de la producción total de hidrógeno, por la enorme cantidad de energía necesaria para la electrólisis, muy costosa si pretendemos que proceda de fuentes renovables para mantener al mínimo la huella de carbono. De momento, no es el método más competitivo, pues tiene un coste entre 3-5 \$ por kg, más cerca de 5 que de 3, incluso asumiendo alegremente que la electricidad de fuentes renovables nos saliera por debajo de 70 \$/Mwh. Esas cifras son mucho peores que los 1,80 \$ del mayoritario hidrógeno gris, producido por reformado del metano. Todo dependerá pues de que el precio de la electricidad de fuentes renovables siga bajando en el futuro, como lo ha ido haciendo hasta ahora, pero la transición energética va a ser más cara y más lenta de lo que creemos. Seguimos sacando el 84% de nuestra energía del petróleo, el carbón y el gas natural, y las energías eólica y solar suman sólo un 3,3%. Alguno podría preguntarse entonces por qué para movilidad y transporte de mercancías no utilizamos directamente como vector la electricidad que gastamos en hacer hidrógeno, en vez de buscar un vector gaseoso y tan complicado, ya que la electricidad la podemos llevar instantáneamente donde queramos mediante simples hilos de cobre y su red de distribución está ya disponible, excepto la red de conexiones para recargar las baterías de nuestros vehículos. No soy experto en el tema ni puedo dar cifras, pero creo que el problema radica en la escasa capacidad y lentitud de carga de las actuales baterías, tema en el que también se está trabajando intensamente. Aquí hay que señalar, por supuesto, que el hidrógeno, al igual que el petróleo, no sólo sirve para quemarlo, sino afortunadamente también para hacer química, como amoníaco por reacción con el nitrógeno atmosférico (proceso Haber-Bosch), gasolinas o combustibles equivalentes con productos carbonados clásicos o de origen sostenible o los muchos productos químicos que requieren reacciones de hidrogenación para ser preparados. En esos casos, el hidrógeno no suele almacenarse ni transportarse, sino que se montan las fábricas que lo producen junto a las que lo transforman.

Hablemos por fin del hidrógeno natural, llamado blanco o dorado (aquí todos tienen su color), que no requiere prepararse, pero que se creía que existía tan sólo en cantidades insignificantes en nuestro planeta. Casi siempre aparece acompañado de otros gases minoritarios, algunos muy valiosos como el helio. Sin embargo, en los últimos 15 años se ha demostrado que el hidrógeno natural es muy abundante, y curiosamente no se había detectado en las

muestras rutinarias de pozos de petróleo porque se empleaba el propio hidrógeno como gas portador en los equipos de análisis por cromatografía de gases utilizados. En la última década la situación se ha revertido, y ya hay centenares de publicaciones sobre el tema en revistas de geología y de química, algunos de los cuales me he tomado la molestia de leer e intentar descifrar, incluso hablando con geólogos y especialistas en minería, y aprovechando el tiempo que mi (privilegiada) condición de jubilado me ofrece.

¿Dónde está ese hidrógeno natural, ya listo para su uso? ¿Cómo se forma? ¿Cuánto hay? ¿Por qué muchos expertos afirman que es sostenible? Uff, ya empiezan las preguntas... Tendré sin duda que escribir más columnas sobre el tema, ésta es sólo un aperitivo para abrir el apetito de mis lectores, y ya se va haciendo un poco larga, por lo que diré abreviadamente que se encuentra entre las rocas del subsuelo (ofiolitas, kimberlitas volcánicas o serpentinitas metamórficas, entre otras), emanando libremente por filtraciones, respiraderos o cráteres, y puede obtenerse también a profundidades asequibles para su extracción (menos de 3000 m). Se forma por procesos físico-químicos todavía sin elucidar por completo (se han descrito hasta 30 tipos de interacciones entre las rocas y el agua, a presiones y temperaturas moderadas, catalizadas por iones de hierro, magnesio y otros, que generan hidrógeno). No existe todavía un consenso sobre cuánto hay (pero eso también pasa con el petróleo, tras casi dos siglos de explotación), si bien los últimos datos estiman que es considerable. Se ha encontrado en muchos lugares, y los mapas de localización se amplían día a día. En Europa y otros países parece que el hacer agujeros en el suelo tiene mala fama, y eso frena a las autoridades en la concesión de licencias de prospección, limitando la evaluación de su abundancia, pero en Estados Unidos, Canadá, Brasil, África central, Australia o Rusia es una realidad creciente. Lo más importante es que el proceso de generación parece ser continuo, y algunas emanaciones emiten flujos de intensidad constante durante muchos años, desde que se conocen. Es famosa una chimenea de gas cerca de Antalya (Turquía) que lleva ardiendo más de 2500 años sin menguar y que contiene 7,5-11,3% de  $\text{H}_2$ . Se cree que fue la fuente de la primera llama olímpica. Si hay regeneración, la pregunta obligada sería ¿a qué ritmo? Porque si al final consumimos este hidrógeno natural más rápidamente de cómo se genera (desgraciadamente lo hemos hecho así con el petróleo), no tendría mucho sentido prestarle más atención al tema. Parece que su regeneración es más rápida que la del petróleo, que requiere miles de años, por muestra el ejemplo olímpico citado y muchos otros casos. Y acabo con un pronóstico, debido nada menos que a Julio Verne, considerado el padre de la ciencia-ficción, que escribió en 1865 en *La isla misteriosa* estas proféticas palabras: *Sí, amigos míos, creo que el agua se empleará algún día como combustible, y que el hidrógeno y el oxígeno que la constituyen, utilizados juntos o por separado, proporcionarán una inagotable fuente de calor y de luz, de una intensidad que el carbón no es capaz de producir.* Seguiremos con el tema...

JAVIER DE MENDOZA