

¿Es el hidrógeno una solución para descarbonizar el transporte público y privado?¹

Natalia Orduz Salinas, investigadora de Indepaz

El 27 de marzo de 2023, funcionarios de más alto nivel del gobierno nacional, distrital y empresarial presentaron públicamente el “inicio del piloto de movilidad con hidrógeno de bajo carbono en Bogotá”: concretamente, del primer bus de transporte público que se impulsará con hidrógeno. Este proyecto, financiado por el Fondo de energías no convencionales -reglamentado por el Ministerio de Minas y Energía-, Ecopetrol y Fanalca, costó 22 mil millones de pesos. Logró el diseño y ensamblaje en Colombia del primer bus de hidrógeno y la instalación de la tercera hidrogenadora (el equivalente a una gasolinera, pero de hidrógeno). Transmilenio fue clave en la coordinación interinstitucional de todo el proceso.



Irene Vélez, entonces Ministra de Minas y Energía le entrega a a alcaldesa Claudia López la primera llave del primer bus que será impulsado con hidrógeno. Foto: Semana.com

El [evento](#) comenzó con la presentación de un video titulado “por qué el futuro se escribe con H”. Irene Vélez, entonces Ministra de Minas y Energía, enfatizó en que “este es un gran ejemplo de cómo la concurrencia entre la política nacional y las políticas empresariales y las políticas locales pueden realmente surtir frutos de cambio en la lucha contra el cambio climático y en la lucha por la sustentabilidad ambiental” y que la importancia de este proyecto es que “materializa un sueño en transición energética”; y entregó a Claudia López, alcaldesa en ese momento, la llave de la primera molécula verde del transporte público. “Este es un logro de país, de logro de ciudad, un logro del sector público nacional y local y un logro del empresariado colombiano”, celebró López y prometió que este con certeza no será el último bus de hidrógeno.

Felipe Bayón, entonces presidente de Ecopetrol, prometió que el bus comenzaría a rodar en junio de 2023, tan pronto pasara una serie de pruebas técnicas. Sin embargo, el año 2024 comenzó y el bus no ha comenzado a andar. Todavía es incierto cuándo cumpla todos los requisitos de

¹ Este artículo fue elaborado tras la visita al centro Econova de Ecopetrol en Cartagena y una conversación con varios directivos de la empresa. La solicitud de conocer el bus de hidrógeno en Bogotá y la hidrogenadora fue negada por Transmilenio, pero fue posible entrevistar a una funcionaria experta en los procesos de sostenibilidad el 23 de noviembre de 2024.

seguridad y viabilidad para que pueda ser matriculado y pueda transportar pasajeros. Aunque, según Bayón, con la infraestructura existente podrían alimentarse entre ocho y diez buses articulados, o 16 más pequeños, los planes de expansión de este sistema están subeditados a cómo le va al primer bus de hidrógeno prestando su servicio público. A este ritmo y con los altos costos, una ampliación de la flota de hidrógeno en Bogotá se ve aún muy lejos. El programa de gobierno de Carlos Fernando Galán no menciona la movilidad pública con hidrógeno, sino la transición a gas natural y electricidad.



Así es el primer bus de hidrógeno en Bogotá.
Foto tomada de mundoeléctrico.com

El hidrógeno como combustible

El hidrógeno es el elemento químico que más abunda en nuestro planeta y en el universo. De hecho, el sol quema hidrógeno de manera permanente. Cuando consuma todo su hidrógeno, el sol comenzará a oscurecerse y a contraerse, hasta colapsar. El hidrógeno en estado puro es muy inflamable y escaso, pero está presente en muchas moléculas, como las de los hidrocarburos y las del agua (H_2O). Para extraer el hidrógeno del agua, se necesita una buena cantidad de energía. Cuando esta energía proviene de una fuente renovable, se habla de hidrógeno verde. Se trata de un proceso casi mágico: la extracción de un combustible a partir del agua usando la energía del sol o del viento.

El hidrógeno verde es alternativa muy celebrada porque ni la energía necesaria para la electrólisis (el proceso que separa el hidrógeno del agua), ni la quema del hidrógeno producen gases efecto invernadero. Por su posición geográfica, Colombia tiene buen potencial en energías renovables y se montó en la ola global de generar políticas públicas para facilitar y potenciar la producción y uso de hidrógeno. El expresidente Duque dejó lista la “Hoja de Ruta”... y varias normas. Organismos multilaterales, agencias de cooperación, otros gobiernos y empresas privadas han auspiciado espacios de diálogo y generación de grandes expectativas en torno al hidrógeno verde.

Hay, sin embargo, hidrógeno de otros colores en las que sí se producen emisiones. El hidrógeno también está presente en las moléculas de los hidrocarburos y del carbón, pero al sacarlo de ahí, se produce CO_2 . Cuando los gases se liberan a la atmósfera, se habla de hidrógeno gris. Cuando se impide que estos gases se emitan, se habla de hidrógeno azul. En este caso, los gases se capturarían, almacenarían o usarían en la industria por medio de tecnologías llamadas CCUS por sus siglas en inglés. Estas CCUS están todavía en fase de prueba y todavía no es clara su efectividad en el largo plazo ni sus impactos socioambientales. Menos del 1% del hidrógeno que se produce en el mundo es verde o azul.

El despliegue del hidrógeno en el transporte es todavía muy incipiente y está en fase de experimentación, como el piloto del bus en Bogotá y otros lugares. Desde los años noventa hay experimentos con buses de hidrógeno en varias ciudades del mundo, pero sólo desde nuestra década ha habido un despliegue comercial y la cantidad de buses rodando es aún bajita. En enero de 2023, había [370 buses](#) en toda Europa. La delantera la lleva por supuesto China que a finales de 2021 tenía ya más de [5300](#) andando. Todavía son cifras muy marginales.

Una sola tanqueada de ocho minutos le da suficiente energía al bus de Bogotá para andar 450 km. Sin embargo, las desventajas del hidrógenos son grandes y difíciles de superar. Es un gas muy reactivo y, por lo tanto, muy peligroso, lo que supone enormes retos en su producción, transporte y almacenamiento. Otro problema es su bajísima densidad en estado gaseoso. Es posible licuarlo, pero en ello se va entre el 30 y el 40% de la energía que puede liberar el mismo hidrógeno.

Y hay un problema adicional. Si el gas se escapa, como lo hacen todos los gases en procesos industriales, puede contribuir a la concentración de gases efecto invernadero. No porque el hidrógeno lo sea, sino porque puede interferir en la química atmosférica y potenciar las concentraciones del metano, un poderoso gas efecto invernadero. El hidrógeno en la atmósfera también puede tener impactos en el vapor, el ozono y en general en la calidad del aire. Estos riesgos se han subestimado, porque el hidrógeno en sí mismo parece bastante inocuo y porque, como en la mayoría de las soluciones tecnológicas, se confía en que se minimizarán al máximo las fugas².

¿Será competitivo?

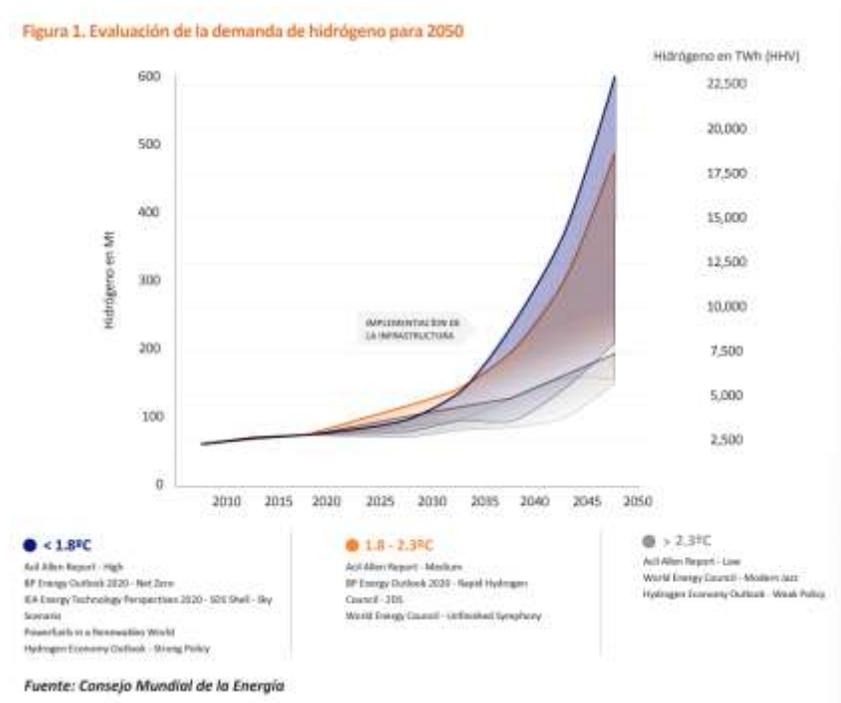
Es posible que el avance tecnológico y la comercialización masiva conduzcan a una reducción de los precios. Sin embargo, durante esta década, las capacidades serán limitadas: las plantas de producción de hidrógeno son todavía muy pequeñas y la infraestructura para transportarlo, inexistentes. El proceso de construcción de ductos puede demorarse al menos una década y requiere importantes inversiones. El costo para los consumidores finales podrá bajar dependiendo de la fuente de energía que se utilice (solar, eólica, hidráulica) y de que disminuyan los costos en general después de pasar de la curva de aprendizaje a la comercialización masiva. Con todo, el almacenamiento y el transporte no dejarán de ser difíciles. Para que sea competitivo frente a fuentes más contaminantes, se requieren también medidas como impuestos al CO₂ y en general, que bajen los precios de las energías renovables³.

Se han construido distintos escenarios que evalúan el crecimiento de la demanda y de los costos. Lo que tienen en común es que son extremadamente variables, porque dependen de muchísimos factores externos. Por ejemplo, escenarios que contemplan distintos niveles de ambición climática muestran demandas de hidrógeno muy distintas. Una meta climática más ambiciosa, implicaría un crecimiento exponencial de la demanda de hidrógeno. Una meta más laxa, un crecimiento casi

² Bertagni, M.B., Pacala, S.W., Paulot, F. *et al.* 2002. *Risk of the hydrogen economy for atmospheric methane*. *Nat Commun* **13**, 7706, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35419-7>

³ Consejo Mundial de la Energía. 2021. *Hidrógeno en el horizonte: ¿preparados, listos, ya?: Demanda de hidrógeno y dinámica de costes*. Disponible en https://www.worldenergy.org/assets/downloads/ES_-_Innovation_Insights_Briefing_-_Hydrogen_on_the_Horizon_-_Ready%2C_almost_set%2C_go.pdf

lineal. Lo que tienen en común ambos escenarios, es que sólo habría un crecimiento significativo a partir de 2035, puesto que preparar la infraestructura necesaria necesita al menos una década.



Gráfica 1. Evaluación de la demananda de hidrógeno. Fuente : Consejo Mundial de la Energía

El sueño del uso masivo del hidrógeno en el transporte público implicaría, en consecuencia, comenzar lo más pronto posible a preparar los ductos, las estaciones, las formas de almacenamiento y transporte, y todas las demás condiciones necesarias para que este combustible sea una solución escalable. El piloto de Bogotá sólo contempló la construcción del bus y de una hidrogenera. Sin embargo, para Transmilenio, los futuros pasos dependerán del análisis del desempeño del bus una vez comience a andar, lo cual aún no ha ocurrido.

¿Será para todos?

Además del proyecto del bus en Bogotá, Ecopetrol tiene otro proyecto de movilidad con hidrógeno en el centro Econova en Cartagena. Allí cuenta con una hidrogenera y un carro Toyota Mirai que ya tiene matrícula y puede andar con libertad. Un carro así consume 0.8 kg de hidrógeno por cada 100 kilómetros y cuesta 75 mil euros que son \$400 millones de pesos. La hidrogenera de la refinería de Cartagena produce 20kg diarios de hidrógeno. Es decir que con lo que esta hidrogenera produce al día se podría andar 2500 km. Suponiendo que en promedio los carros anden 50km diarios, esto sería suficiente para 50 carros al día.

Los costos de las estaciones de tanqueo con hidrógeno son, todavía muy altos. Según la Universidad de Cranfield, en el Reino Unido, en 2022, ascendían a entre 1,5 y 2,5 millones de dólares, razón por la que en ese año sólo había 11 estaciones públicas. A menos que se reduzcan sustancialmente estos costos, con una fuerte inversión estatal y privada en innovación tecnológica y otros factores, en 2050 sólo el 0.01 de los carros andarían con hidrógeno⁴. En [Alemania](#), en donde está el número más grande de estaciones de hidrógeno de Europa, los costos de tanqueo siguen siendo poco competitivos. Para recorrer 100km se necesitan 18 euros, el doble de lo que gasta un carro eléctrico. Hay que tener en cuenta que el Estado alemán da subsidios para el hidrógeno en el transporte, que, además, es hidrógeno gris en la mayoría de los casos. Por eso, a pesar de ser el país que tiene el liderazgo en el tema y que lo promueve en otros países, como en Colombia, en 2023 tenía apenas había menos de 1000 carros con hidrógeno circulando⁵.



Entrega del vehículo de hidrógeno en el Centro Econova, Cartagena.
Imagen tomada de elcarrocolombiano.com

La movilidad privada con hidrógeno es hoy una solución tan costosa que sólo puede ser utilizada por un segmento de la población. Los vehículos de hidrógeno son una nueva gama de artículos de lujo y, dados los altos retos tecnológicos y económicos, es muy probable que lo sigan siendo. En ese caso, su contribución a la disminución de gases efecto invernadero puede ser marginal y su producción tendría varios cuestionamientos de justicia ambiental, dado que sólo un segmento adinerado de la población podrá usar un hidrógeno que es costoso para toda la sociedad en términos energéticos, territoriales, técnicos y financieros.

⁴ Cranfield University, *How a UK hydrogen car industry could cut fuel costs and carbon emissions*, 14 de junio de 2023, publicado en <https://www.cranfield.ac.uk/press/news-2023/how-a-uk-hydrogen-car-industry-could-cut-fuel-costs-and-carbon-emissions>

⁵ T-online, *So viel kosten 100 Kilometer im Wasserstoffauto*, 6 de septiembre de 2023, publicado en https://www.t-online.de/mobilitaet/aktuelles/id_100231998/wasserstoff-auto-so-viel-kostet-eine-100-kilometer-fahrt-damit.html

¿Es eficiente?

Todavía no existe un consenso científico sobre la eficiencia energética del hidrógeno verde y sobre los indicadores para medirla. La tasa de retorno energético señala cuánta energía se gana a partir de cuánta energía se invierte. Por ejemplo, si en un proceso de extracción de energía invierto una unidad de energía y obtengo 10 unidades de energía, la TRE sería de 10. La TRE de los combustibles fósiles ha ido decayendo, porque con el paso del tiempo, sólo van quedando los que son más difíciles de extraer. Por ejemplo, el carbón pasó de tener una TRE de 80 en los años cincuenta del siglo pasado a una de 46 en 2013⁶.

Las energías renovables tienen TRE menores a las que tuvieron los combustibles fósiles en sus mejores épocas: en otras palabras, no reemplazan las mejores épocas del petróleo y el carbón. Para producir hidrógeno, no sólo se tiene que invertir energía en la extracción de las energías renovables, sino también en los procesos de licuado, enfriamiento, almacenamiento y transporte⁷. Es decir, el retorno de energía después de todo el proceso puede ser muy bajito e incluso, según algunas [estimaciones](#), puede ser negativo.

Por otro lado, urgen cálculos certeros de cuánto territorio y cuánta agua deberá poner el país al servicio de las energías renovables y el hidrógeno verde para alcanzar las metas trazadas. La instalación de parques eólicos ya ha generado cuestionamientos a la violación de derechos territoriales y culturales y a la participación de los pueblos indígenas de La Guajira. Estos proyectos traerán nuevos conflictos sobre los usos del suelo y podrán cambiar la vocación agrícola o de conservación ambiental de muchas zonas del país. En los documentos de política pública de transición energética no se abordan estas preguntas ni se presentan cálculos y proyecciones precisas.

No hay información pública clara sobre los costos territoriales, energéticos, ambientales y sociales que implicaría la producción de hidrógeno verde a gran escala en Colombia; tampoco, sobre cuáles son los usos más necesarios y prioritarios para aprovechar una energía tan difícil y costosa de producir. Probablemente, la opinión pública no se inclinaría por carros de altísima gama.

Los escenarios para el hidrógeno en Colombia

La primera hidrogenera que construyó Ecopetrol se utiliza en la refinería en Cartagena. Produce 20kg de hidrógeno al día y el hidrógeno producido reemplaza al gas en el proceso de extraer el azufre de los combustibles que se producen allí. Ecopetrol produce al año 130 kilo toneladas de hidrógeno, en donde el 90% es gris y el 10% es azul. El dióxido de carbono que se obtiene de la producción de hidrógeno azul de Ecopetrol se vende a la industria de gaseosas. Es decir, se retrasa su expulsión a la atmósfera, porque ahora lo hacemos los consumidores de estas bebidas cuando exhalamos.

⁶ Charles A.S. Hall, Jessica G. Lambert, Stephen B. Balogh. 2014. *EROI of different fuels and the implications for society*. Energy Policy 64, 141-152,

⁷ Guevara-Ramírez W, Martínez-de-Alegría I y Río-Belver RM. 2023. *Evolution of the conceptualization of hydrogen through knowledge maps, energy return on investment (EROI) and national policy strategies*. Clean Technologies and Environmental Policy 25, 69–91. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02388-w>

La hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia prevé que el hidrógeno gris sea cada vez más costoso, porque asume que aumentarán los impuestos al carbono. El azul, en cambio, tendría un precio estable hasta el 2050, porque el costo creciente de las emisiones se compensaría con tecnologías cada vez más baratas. Sin embargo, capturar o almacenar el CO2 es muy costoso y sólo habrá incentivos fuertes del mercado si emitirlo es más costoso que almacenarlo. Además, el almacenamiento de CO2 por ejemplo bajo tierra es un tema que podrá traer nuevos conflictos socioambientales en el país. A pesar de todas estas dificultades, la hoja de ruta considera que el hidrógeno azul “hará posible una descarbonización temprana de determinadas aplicaciones industriales, como el sector de la refinación”.

Para el hidrógeno verde, en cambio, la Hoja de Ruta prevé que los precios bajen considerablemente con el paso del tiempo. En la región en la que desde hoy es más rentable es en el Caribe Norte, especialmente, en La Guajira, en donde por su potencial eólico serían incluso muy competitivos en comparación con otros países, como Chile o Australia. Se prevé que los precios de energía solar serán también más competitivos desde 2030. Mientras tanto, los proyectos de hidrógeno se alimentarán de la red nacional de electricidad, que tiene un alto porcentaje hidráulico. De hecho, la energía para la producción de hidrógeno para el bus de Bogotá es del sistema eléctrico nacional. Los paneles solares que existen en el patio automotor entregan la energía a la red, no a la hidrogenera.

Las proyecciones para movilidad con hidrógeno

Como hemos visto, hay muchos retos todavía para que el hidrógeno se constituya en una fuente de energía masiva para el transporte. Según las proyecciones de la hoja de ruta del hidrógeno en Colombia, primero crecerán los usos industriales y después el del transporte. En todo caso, en 2050, más de la mitad del hidrógeno producido irá para el transporte:

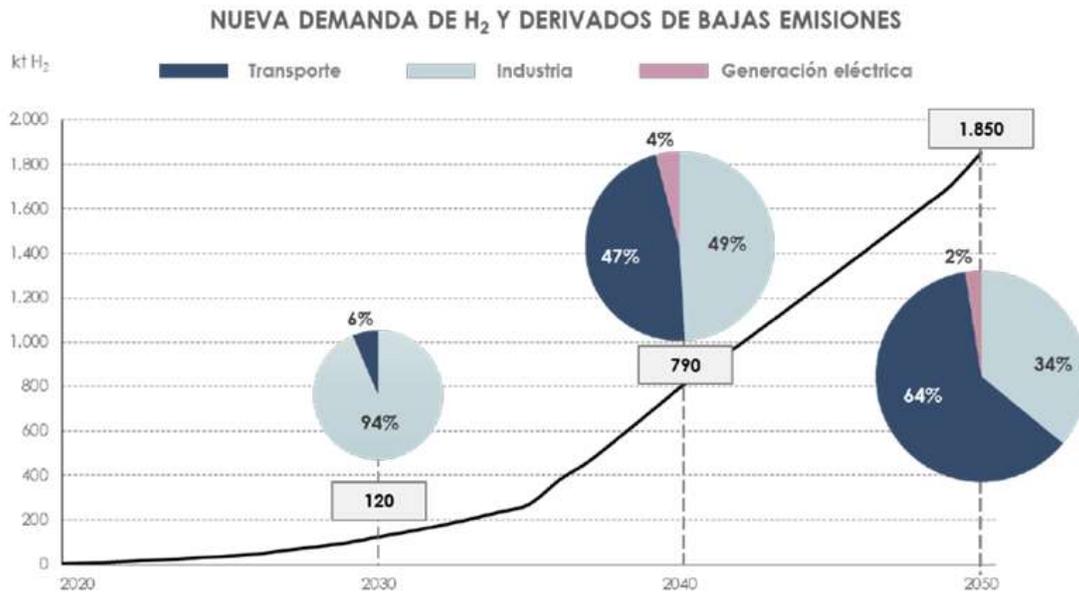


Figura 9: Evolución prevista de la nueva demanda de hidrógeno y derivados de bajas emisiones

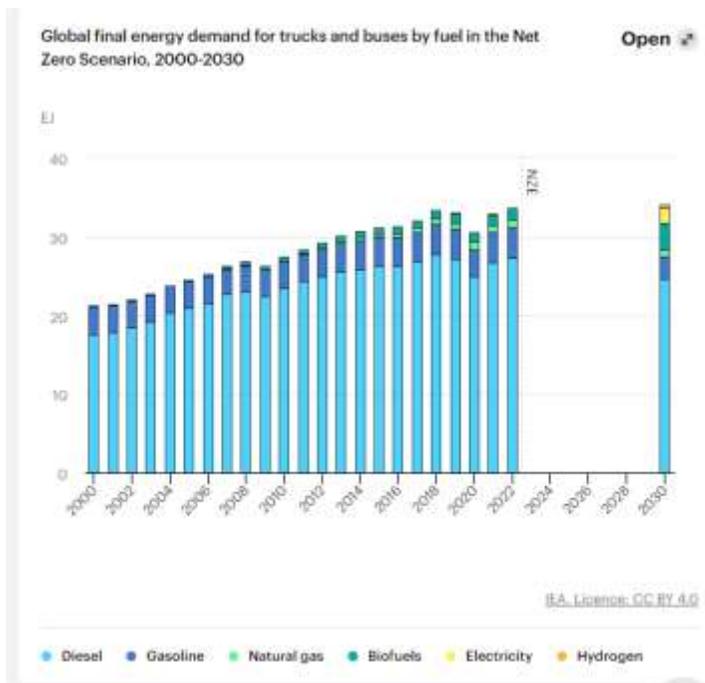
Fuente: Hoja de Ruta de hidrógeno

Sin embargo, este crecimiento dependerá de factores externos, como que los costos de producción bajen, los impuestos al carbono suban, las metas climáticas sean ambiciosas y se construya la infraestructura necesaria con relativa velocidad.

Para 2030, la Ruta prevé que en Colombia existan entre 50 y 100 hidrogeneras de acceso público para alimentar entre 1500 y 2 mil carros y entre mil y 1500 buses o camiones. En Bogotá, que es la capital, el único bus de hidrógeno no ha comenzado a rodar y Transmilenio no tiene ningún plan para escalar el hidrógeno hasta que el bus no dé algunos resultados positivos. Como se vio arriba, este proyecto fue financiado mayoritariamente por Ecopetrol y por el gobierno nacional como un proyecto de investigación y desarrollo, y fue, en consecuencia, celebrado como la realización de un sueño tecnológico. El salto a que este se convierta en una solución de transporte público, depende todavía de muchas variables y de altas inversiones.

Las soluciones climáticas en el transporte van por otro lado

Y es que, en realidad, incluso para la Agencia Internacional de Energía, el hidrógeno en el transporte será siempre una solución muy marginal, incluso si se busca alcanzar el mejor escenario de reducción de emisiones (Net Zero Scenario). Para la agencia, los mayores esfuerzos deben ser el cambio a otras modalidades de transporte, como los trenes. La cantidad de buses y camiones no debería seguir aumentando. La electrificación debería alcanzar en 2030 el 6% y el hidrógeno, apenas el 1%. También, según la IEA, debería aumentar la participación de los biocombustibles:



Gráfica 2. Las proyecciones de la [Agencia Internacional de la Energía](#) para alcanzar a 2030 para alcanzar un escenario de cero emisiones

El hidrógeno, entonces, aparece en el panorama como una opción energética marginal para el transporte público y un lujo para el transporte privado. Aunque el proceso, en la teoría es sencillo y mágico (agua+sol/viento=energía), en la práctica no lo es.

No hay todavía condiciones tecnológicas y financieras para garantizar una infraestructura segura destinada a un gas explosivo y que ocupa tanto volumen; hay incertidumbre o al menos poca información pública sobre su eficiencia energética, así como sobre la cantidad de otros recursos necesarios para su producción (extensiones territoriales, materias primas); el hidrógeno azul está en una etapa todavía muy exploratoria; no existen aún las salvaguardas sociales para prevenir nuevos conflictos sobre el uso del suelo; y su desarrollo depende de muchos factores externos como la voluntad política de los gobiernos para preparar la infraestructura, gravar el carbono, fijar metas climáticas. Por ahora, se presenta como un gran hallazgo y una promesa de la tecnología, pero en la práctica, es un recurso para vehículos privados de lujo o públicos con altísimos costos.

Por lo pronto, esperamos que comience a andar el primer bus de hidrógeno en Bogotá que, por ahora, será el único o uno de muy pocos. Es entendible el aplauso de las autoridades al avance tecnológico y a la unión de entidades públicas y privadas para sacarlo adelante. Sin embargo, la ciudadanía necesita conocer los análisis y proyecciones reales para mitigar la crisis climática, y poder exigir que los esfuerzos presupuestales y políticos se dirijan a soluciones efectivas, más allá de titulares esperanzadores que se quedan, casi un año después, sin desarrollo.

