

Impactos del hidrógeno en el sistema climático

Autores:

- Rodrigo Seguel, investigador CR2
- Charlie Opazo, investigador CR2
- Lucas Castillo, investigador CR2

Edición:

- José Barraza, divulgador científico CR2

- El hidrógeno ocasiona que el metano, un gas de efecto invernadero (GEI), se mantenga por más tiempo en la atmósfera, propiciando un mayor calentamiento global.
- La transformación química del hidrógeno genera una mayor cantidad de ozono, otro GEI de importancia para el cambio climático.
- La degradación del hidrógeno también produce vapor de agua en la estratósfera baja, provocando un calentamiento a nivel de la superficie del planeta.

Contextualización

El hidrógeno molecular (H_2) es un gas con alto contenido energético en comparación con otros combustibles fósiles, pudiendo ser utilizado en motores de combustión interna (modificados) o a través de celdas de combustible (Staffell et al., 2019). Para obtener H_2 , las moléculas de agua son divididas mediante electricidad, obteniendo hidrógeno y oxígeno en forma de gas, proceso conocido como electrólisis.

Desde el 2020, el interés por el H_2 ha aumentado debido, especialmente, a que su producción industrial mediante electrólisis puede ser generada a partir de energías renovables (Pétron et al., 2024). En el caso del norte de Chile se basaría, principalmente, en paneles solares y en el sur, en turbinas eólicas. Así, emerge como una alternativa relevante para lograr la descarbonización en el país y para la transición energética global orientada al bajo consumo de carbono.

Cabe señalar que ningún proceso de generación de energía conocido hasta la fecha es totalmente inocuo para el medio ambiente. En el caso del hidrógeno molecular, el principal impacto de la producción, transporte y almacenamiento se asocia a las fugas, venteos y purgas, cuya emisión a la atmósfera se estima que puede variar entre un **1 y 12 %** (Patterson et al., 2021). Debido a que el mercado del hidrógeno es incipiente en Chile, la anticipación a sus impactos en el sistema climático es fundamental para evitar que su uso y posibles impactos sobrepasen sus beneficios.

Estado del conocimiento

La presencia de hidrógeno molecular en la atmósfera puede ser natural o causada por actividades humanas. Así, puede darse por formación **fotoquímica**¹ a partir de metano y compuestos orgánicos volátiles biogénicos, quema de biomasa y combustibles fósiles, respectivamente (Paulot et al., 2024). Por otro lado, los principales sumideros del hidrógeno corresponden a la actividad microbiana en suelos y reacciones fotoquímicas que incluyen al principal agente de limpieza atmosférico (técnicamente conocido como radical hidroxilo). En relación con su tiempo de permanencia en la atmósfera, se ha estimado que el hidrógeno molecular puede mantenerse por dos años (Novelli et al., 2009).

El hidrógeno es considerado un gas de efecto invernadero indirecto con un elevado **potencial de calentamiento global**. La emisión a la atmósfera de 1 kg de hidrógeno producirá un calentamiento global equivalente a 11,6 kg de dióxido de carbono (CO₂) dentro de un período de 100 años (Sand et al., 2023). Este impacto del hidrógeno en el sistema climático se puede explicar de la siguiente manera:

1. El hidrógeno molecular y el metano (el segundo gas de efecto invernadero más potente) compiten por el mismo agente que los destruye en la atmósfera. Por lo tanto, a mayor abundancia de hidrógeno, mayor será el tiempo de vida o permanencia del metano en la atmósfera y, por ende, mayor calentamiento global.

2. La destrucción química del hidrógeno produce un agente altamente reactivo (técnicamente conocido como radical hidroperoxilo), cuyas reacciones posteriores aumentan la formación de [ozono troposférico](#) (el tercer gas de efecto invernadero en importancia para el cambio climático). Este proceso es aún más relevante en atmósferas con elevados niveles de óxido nítrico como es el caso de las megaciudades de América del Sur.
3. Finalmente, la degradación de hidrógeno molecular también produce agua, cuyo impacto en la tropósfera es considerado irrelevante. Sin embargo, pequeños cambios en el vapor de agua en la estratósfera, caracterizada por tener una alta sequedad, producen efectos en la circulación de la atmósfera cuyo resultado es un calentamiento a nivel superficial.

Estimaciones recientes muestran que la abundancia de hidrógeno en la atmósfera ha aumentado en un **70 %** respecto del periodo preindustrial debido a actividades antropogénicas (Patterson et al., 2021). También, las observaciones globales indican que el hidrógeno ha incrementado durante el período 2010-2019 (Paulot et al., 2024). Además, la **Figura 1** muestra una tendencia al alza para el hidrógeno en zonas remotas de Chile (Rapa Nui) y Argentina (Ushuaia).



¹ Reacciones químicas en la atmósfera que incluyen absorción de radiación solar.

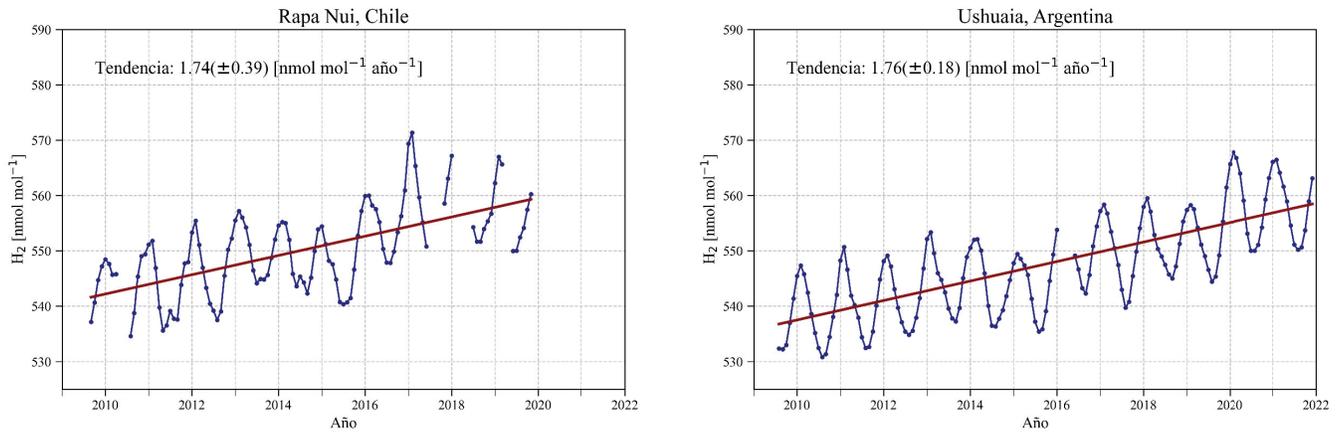


Figura 1. Tendencia de hidrógeno molecular en regiones remotas del Pacífico sur (izquierda) y Patagonia (derecha) basada en promedios mensuales. En Rapa Nui y Ushuaia se observa un aumento anual cercano a los 2 nmol mol⁻¹, lo cual representa un total acumulado de 18 nmol mol⁻¹ en una década. Mediciones realizadas por el Laboratorio de Monitoreo Global de la NOAA (EE.UU).

Desafíos científicos y tecnológicos

A primera vista, estos resultados alertan de una potencial subestimación de las emisiones de hidrógeno y las dificultades para estimar su balance global. También subrayan los desafíos científicos y tecnológicos de esta prometedora alternativa de reemplazo a los combustibles fósiles y cuyos beneficios climáticos dependerán de las tasas de emisión que la industria, agencias reguladoras y la sociedad establezcan como meta.

Recomendaciones

- Disminuir las brechas de información relacionadas al balance global de hidrógeno y a sus efectos indirectos en el sistema climático con el fin de proyectar el impacto real asociado a su uso masivo.
- Reducir las emisiones de metano, compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno de manera de maximizar los beneficios del uso de hidrógeno.
- Mejorar la cobertura del monitoreo de hidrógeno en sitios remotos para así desacoplar la tendencia al alza respecto del impacto local.
- Fomentar en el país el desarrollo de nuevas tecnologías de medición que permitan estimar líneas base y detectar fugas de hidrógeno molecular.
- Anticipar las estrategias de mitigación de emisiones de hidrógeno a lo largo de toda la cadena de valor.
- Desarrollar planes de adaptación con énfasis en las retroalimentaciones del hidrógeno molecular con otros gases y particularidades geográficas (físicas) de las zonas en que se emplazará la nueva infraestructura.

Referencias

- Novelli, P. C., Crotwell, A. M., & Hall, B. D. (2009). Application of gas chromatography with a pulsed discharge helium ionization detector for measurements of molecular hydrogen in the atmosphere. *Environ Sci Technol*, *43*, <https://doi.org/10.1021/es803180g>.
- Patterson, J. D., Aydin, M., Crotwell, A. M., Pétron, G., Severinghaus, J. P., Krummel, P. B., Langenfelds, R. L., & Saltzman, E. S. (2021). H₂ in Antarctic firn air: Atmospheric reconstructions and implications for anthropogenic emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *118*(36), e2103335118, <https://doi.org/10.1073/pnas.2103335118>.
- Petron, G. B., Crotwell, A. M., Mund, J., Crotwell, M., Mefford, T., Thoning, K., Hall, B. D., Kitzis, D. R., Madronich, M., Moglia, E., Neff, D., Wolter, S., Jordan, A., Krummel, P., Langenfelds, R., and Patterson, J. D.: Atmospheric H₂ observations from the NOAA Global Cooperative Air Sampling Network, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/amt-2024-4>, in review, 2024.
- Paulot, F., Pétron, G., Crotwell, A. M., & Bertagni, M. B. (2024). Reanalysis of NOAA H₂ observations: implications for the H₂ budget. *Atmos. Chem. Phys.*, *24*, 4217–4229, <https://doi.org/10.5194/acp-24-4217-2024>.
- Sand, M., Skeie, R. B., Sandstad, M., Krishnan, S., Myhre, G., Bryant, H., Derwent, R., Hauglustaine, D., Paulot, F., Prather, M., & Stevenson, D. (2023) A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. *Commun Earth Environ*, *4*, <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00857-8>.
- Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N., and Ward, K. R.: The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e>, 2019