

# Evaluación y perspectivas del uso del agua para la producción de hidrógeno verde y derivados en Uruguay



# Contenidos

3	<b>Introducción</b>	18	<b>Conclusiones sobre el consumo de agua</b>	29	Evaluación de recurso hídrico subterráneo en unidades hidrogeológicas
5	<b>Hidrógeno verde y sus derivados</b>	20	<b>Fuentes de agua para los proyectos de H2V</b>	30	Sistema Acuífero Guaraní (SAG)
7	<b>Agua en la producción de hidrógeno verde</b>	21	Recurso hídrico superficial	30	Sistema Acuífero Raigón
9	Tecnologías de electrólisis	21	Información de base y supuestos	30	Cretácicos del oeste (acuífero Litoral Sur)
11	Calidad del agua requerida	22	Alcance y criterios de análisis	31	Escenarios de producción de H2V
11	Agua para refrigeración	23	Mapas en GIS y resultados y análisis del estrés hídrico	31	Estrés hídrico en acuíferos prioritarios
11	Agua ultrapura	26	Escenario de producción de H2V	32	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>
12	<b>Agua en la producción de derivados de H2V</b>	28	Recurso hídrico subterráneo	34	<b>Anexo</b>
13	Metanol verde	28	Agua subterránea en Uruguay	35	Estudios de caso
13	Combustible sostenible de aviación (SAF)	28	Información disponible para el análisis	36	Estudio de caso Arapey alto
14	<b>Alternativas de optimización en el consumo de agua</b>	28	Disponibilidad de agua subterránea	36	Estudio de caso Laguna Merín
16	<b>Proyección de la demanda de agua en la producción de H2V a 2040</b>	29	Disponibilidad de agua subterránea por cuenca hidrográfica	36	Estudio de caso Palmar
17	Uso del agua en la producción de H2V, comparado con otros usos	29	Potencial complementario		

# Introducción



# Introducción

Las ambiciosas metas de descarbonización fijadas a nivel global para 2050 exigen impulsar transformaciones aceleradas y profundas, tanto en las fuentes de energía utilizadas como en el uso de materias primas dentro de los distintos procesos industriales. En este contexto, el hidrógeno verde (H2V) se consolida como un vector energético clave, gracias a su potencial para descarbonizar múltiples sectores, y ocupa un lugar central en las agendas energética y climática, tanto a nivel global como nacional.

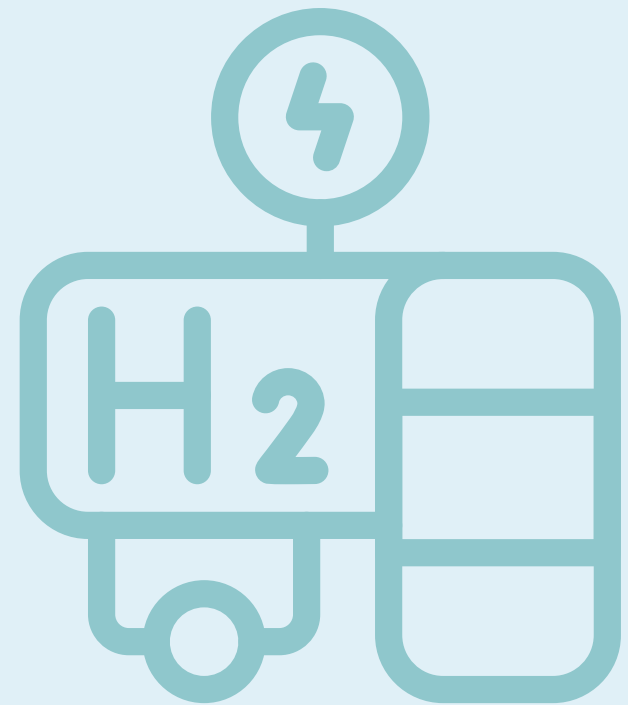
El presente documento ofrece una síntesis integrada de dos estudios impulsados por el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), orientados a generar conocimiento técnico sobre la relación entre el desarrollo de la industria del H2V y la gestión del recurso hídrico en Uruguay.

Uno de los estudios fue elaborado por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería (FING) de la Universidad de la República (Udelar), como parte del convenio entre el MIEM y la Fundación Julio Ricaldoni (FJR-FING-Udelar),

y financiado por CAF – banco de desarrollo de América Latina y el Caribe –. El otro fue desarrollado por el Ing. Víctor Emmer y financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

En conjunto, abordan la disponibilidad del agua superficial y subterránea del país, así como los requerimientos del recurso en los procesos de producción de H2V y sus derivados, aportando una base científica para orientar la planificación y las decisiones vinculadas al desarrollo sostenible de esta nueva industria.

# Hidrógeno verde y sus derivados



# Hidrógeno verde y sus derivados

El H2V se obtiene a partir de un proceso químico conocido como electrólisis, que separa la molécula de agua ( $H_2O$ ) en hidrógeno ( $H_2$ ) y oxígeno ( $O_2$ ), utilizando energía eléctrica de fuentes renovables, como pueden ser el sol o el viento. A diferencia de otras formas de producción, este método no genera emisiones de carbono, lo que convierte al H2V en una alternativa limpia y sostenible.

Por su capacidad para almacenar, transportar y liberar energía sin emitir dióxido de carbono ( $CO_2$ ) al utilizarse, el H2V se perfila como un vector energético para avanzar hacia la descarbonización. Su uso resulta especialmente relevante en sectores que dependen de los combustibles fósiles y son difíciles de electrificar, como la industria pesada, el transporte de larga distancia y la aviación.

El H2V puede combinarse con otros compuestos para generar nuevos productos, conocidos como derivados del hidrógeno. A modo de ejemplo, al unirse con el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), se puede obtener metanol verde o combustibles sostenibles, tales como los utilizados

en aviación (SAF), mientras que su combinación con nitrógeno ( $N_2$ ) permite producir amoníaco. Estos derivados, a su vez, pueden emplearse como insumos en numerosos procesos industriales, para dar lugar a productos como fertilizantes, alimentos, acero, etc.

# Agua en la producción de hidrógeno verde



# Agua en la producción de hidrógeno verde

La producción de H<sub>2</sub>V y de sus derivados requiere el uso de agua en distintas etapas del proceso:

- **Electrólisis:** donde el agua se descompone en H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> mediante el uso de energía eléctrica.
- **Refrigeración:** necesaria para controlar la temperatura de los procesos y garantizar el funcionamiento eficiente de los equipos.

De acuerdo a las cantidades que indica la reacción química (estequiometría), para producir 1 kilogramo de H<sub>2</sub>V se requieren 9 litros de agua ultrapura. Sin embargo, para alcanzar esa calidad de agua y para llevar a cabo la electrólisis, el volumen total de agua que debe extraerse de la fuente es mayor y corresponde a:

- **Tratamientos previos:** Antes de ingresar al electrolizador o al sistema de refrigeración, el agua debe someterse a procesos de purificación. Durante este tratamiento, una parte del agua se rechaza o se descarta para eliminar impurezas.

- **Ineficiencias en la electrólisis:** Una pequeña fracción del agua no llega a transformarse en hidrógeno debido a ineficiencias del electrolizador.
- **Refrigeración:** se utiliza agua para mantener la temperatura de operación de los electrolizadores y representa la mayor parte del requerimiento total de agua en la producción de H<sub>2</sub>V.

Este volumen adicional, principalmente asociado a procesos auxiliares, retorna al ciclo natural del agua de forma relativamente inmediata, ya sea como vapor de agua o como efluente que requiere tratamiento previo a su descarga. Asimismo, cuando el H<sub>2</sub>V o sus derivados se utilizan, el proceso genera nuevamente agua en forma de vapor que se reincorpora también al ambiente.

La cantidad de agua a utilizar dependerá de las condiciones y características propias de cada proyecto. Entre los principales factores que influyen se encuentran:

- La fuente de agua disponible y su calidad.
- La tecnología empleada para la electrólisis.
- El sistema de refrigeración implementado.

En conjunto, estos factores determinan el nivel de consumo hídrico y la eficiencia con que se gestiona el recurso en cada instalación. Los valores habituales de consumo de agua dulce en la producción de H<sub>2</sub>V se sitúan entre **25 y 35 litros por kilogramo de hidrógeno producido**.

## Tecnologías de electrólisis

Para llevar a cabo la electrólisis del agua (el proceso de separar las moléculas de agua en  $H_2$  y  $O_2$ ) se utilizan sistemas que incluyen dos electrodos y un electrolito. Los electrodos son superficies conductoras donde ocurren las reacciones químicas: en uno se libera hidrógeno y en el otro oxígeno. El electrolito es el medio que permite transportar los iones (átomos o grupo de átomos con carga eléctrica) entre los electrodos, facilitando el flujo de electricidad necesario para que el agua se divida en sus componentes.

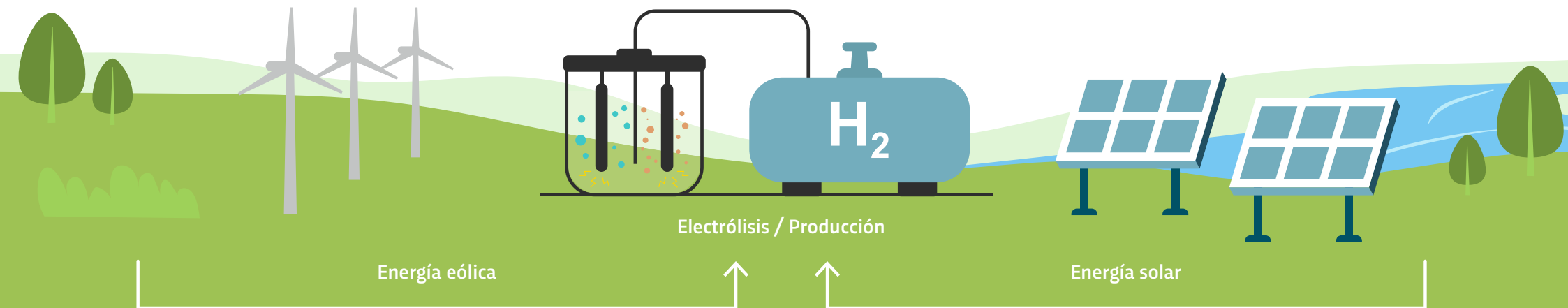
El proceso de electrólisis tiene una eficiencia en el uso del agua de aproximadamente 90 %. Esto significa que, de cada 10 litros de agua que entran al electrolizador, aproximadamente 9 litros se transforman en hidrógeno, mientras que 1 litro se descarta.

Las tecnologías de electrólisis más utilizadas actualmente para la producción de  $H_2V$  son la electrólisis alcalina (AWE) y la electrólisis por membrana de intercambio protónico (PEM). Ambas tecnologías se diferencian en el tipo de electrolito y en la temperatura a la que operan. Los electrolizadores alcalinos suelen ser más económicos, aunque su eficiencia energética es menor (50-70 %), mientras que los PEM, que usan electrodos de platino, son más eficientes (60-75 %) y permiten generar más hidrógeno en menor espacio.

Estas diferencias afectan también el consumo de agua. Los electrolizadores PEM suelen requerir menos agua total (si se suman la necesaria para electrólisis y refrigeración) que los alcalinos.

Existen además otras tecnologías, como los electrolizadores de óxido sólido y los de membrana de intercambio de aniones (AEM), que tienen gran potencial, pero aún no están suficientemente maduras desde el punto de vista tecnológico, por lo que no se incluyen en este análisis.

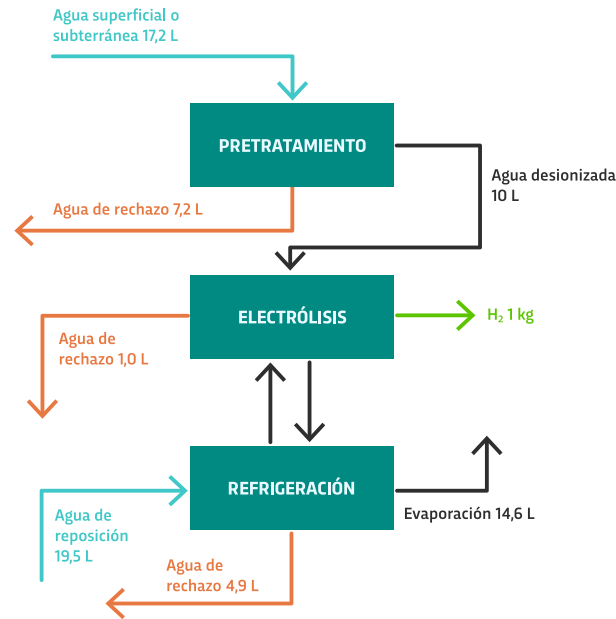
En la Tabla 1 se muestra un resumen de la intensidad de toma de agua requerida para producir 1 kilogramo de  $H_2V$ , al considerar las etapas de tratamiento del agua, electrólisis y refrigeración. Los valores reflejan el consumo total de agua en litros por kilogramo de hidrógeno producido ( $L/kgH_2$ ), según la tecnología de electrólisis utilizada.



**Tabla 1: Resumen de la toma y demanda de agua, de fuentes superficiales o subterráneas, según las tecnologías de producción de hidrógeno verde**  
Adaptado de: IRENA, 2023

Tipo de electrolizador	Intensidad de toma de agua (Tratamiento + Electrólisis + Refrigeración) (L/kgH <sub>2</sub> )		
	Max	Min	Medio
Electrólisis alcalina	36,7	31,9	34,3
Electrólisis PEM	28,5	27,0	27,7

**Figura 1: Esquema de extracción y consumo de agua en L para producir 1 kg de (específicamente para electrólisis alcalina)**  
Adaptado de: IRENA, 2023



Como señala la Figura 1, durante la producción de H<sub>2</sub>V con electrolizadores alcalinos, utilizando sistemas de refrigeración semicerrados y agua de fuentes superficiales o subterráneas, la refrigeración consume aproximadamente el 53 % del agua total extraída.

Cabe destacar que los datos utilizados en este esquema fueron adaptados de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por su sigla en inglés) y se basan en modelos ingenieriles diseñados por la industria.

A su vez, las cantidades de agua efectivamente demandadas y tomadas de la fuente de agua serán específicas de cada sitio y pueden variar en función de la fuente, la calidad del agua de toma y de la tecnología utilizada tanto para la electrólisis como para la refrigeración.

## Calidad del agua requerida

La producción de H<sub>2</sub>V requiere agua de distintas calidades para asegurar la eficiencia del proceso y el buen funcionamiento de los equipos. Como materia prima para la electrólisis, se necesita agua ultrapura.

Además del agua para la reacción química, se requiere agua limpia y tratada para el sistema de refrigeración de los electrolizadores y otros equipos del proceso, en el caso de la producción de derivados. El objetivo de este tratamiento es prevenir problemas comunes, como la corrosión, el crecimiento de microorganismos o la formación de incrustaciones, que reducirían significativamente la eficiencia de la refrigeración.

### Agua para refrigeración

El agua para refrigeración del sistema debe ser limpia y libre de bacterias. Por ejemplo, agua desmineralizada, agua de ósmosis inversa, agua desionizada o agua destilada.

### Agua ultrapura

Se considera agua de calidad ultrapura aquella que presenta baja conductividad, mínimo carbono orgánico y baja concentración de sólidos disueltos.

La calidad final del agua dependerá de la tecnología de electrólisis empleada, el material de los electrodos y el diseño del sistema, por lo que no existe un estándar único. Sin embargo, la norma *American Society for Testing and Materials (ASTM) D1193* es una referencia comúnmente utilizada para definir los parámetros de pureza requeridos.

El tratamiento para alcanzar esta calidad depende de las características de la fuente de agua, pero en general se desarrolla en dos etapas principales:

1. **Pretratamiento**, que acondiciona el agua hasta una calidad similar a la del agua potable.
2. **Pulido**, en el que se eliminan iones, gases disueltos y materia orgánica mediante procesos como ósmosis inversa, ablandadores, desgasificación, filtros de lecho mixto o unidades de electro-deionización.

El coeficiente de recuperación expresa la proporción de agua que, tras el tratamiento, alcanza la calidad requerida respecto al volumen total de agua que ingresa al proceso. Este parámetro determina la eficiencia del tratamiento y, en consecuencia, la cantidad de agua que debe extraerse para abastecer el proceso de refrigeración y de electrólisis. Cuanto más alto es el coeficiente de recuperación, menos agua se necesita extraer de la fuente para un proceso dado.

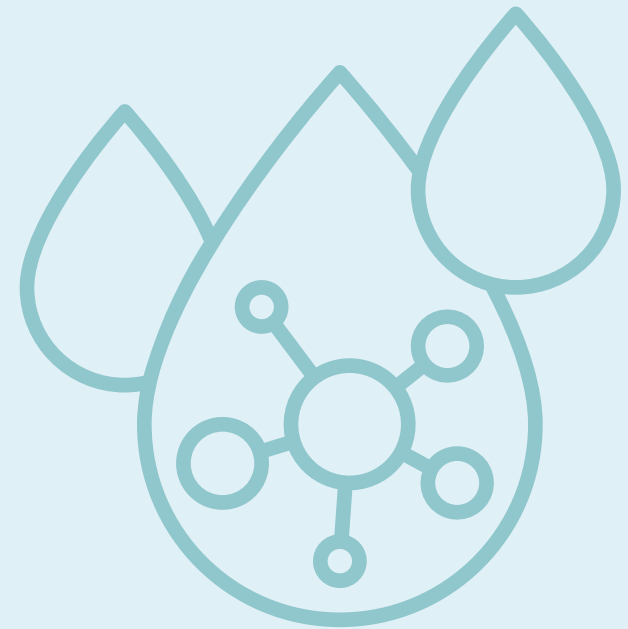
El valor del coeficiente varía según el tipo de tratamiento y la tecnología empleada. En términos generales, pueden asumirse, según la fuente de agua, los siguientes rangos establecidos en la Tabla 2.

**Tabla 2: Coeficiente de recuperación según fuente de agua**

*\* Respecto al agua sometida a tratamiento primario.*

Tratamiento	Fuente de agua	Coeficiente de recuperación (%)
Tratamiento primario	Agua de mar	40 - 50
	Agua superficial	90 - 95
	Agua subterránea	98
Pulido (ósmosis inversa)	Tratamiento primario	75*

# Agua en la producción de derivados de H<sub>2</sub>V



# Agua en la producción de derivados de H2V

## Metanol verde

El metanol verde se produce al combinar H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> ( $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ ) en un proceso llamado hidrogenación catalítica, que usa un catalizador de cobre y zinc a alta temperatura y presión. Por cada kilogramo de hidrógeno se pueden producir aproximadamente 5,27 kg de metanol, y además se genera agua como subproducto (unos 0,57 kg por kg de metanol).

La mayor parte del consumo de agua en la producción de metanol verde corresponde a los sistemas de enfriamiento.

Inicialmente, se requiere agua tanto para la producción de hidrógeno por electrólisis como para la refrigeración del electrolizador. Posteriormente, durante la síntesis de metanol, se libera calor que también debe disiparse mediante enfriamiento. Para eso, se requieren entre 8 y 9 litros de agua (adicionales a la utilizada para la producción de hidrógeno) por cada kg de hidrógeno convertido en metanol. En total, el agua utilizada se estima en el rango de entre 30 a 44 kg por cada kg de

hidrógeno convertido. Entre el 60 % y el 67 % del consumo total, se utiliza para refrigeración de los procesos. La producción de metanol genera agua, que podría ser parcialmente recuperada y reusada en el sistema. El agua recuperada puede reducir el consumo de la fuente de abastecimiento en hasta un 10 %.

## Combustible sostenible de aviación

El combustible sostenible de aviación (SAF, por su sigla en inglés), también llamado *e-jet fuel*, puede producirse a partir de metanol o directamente combinando H<sub>2</sub>V y CO<sub>2</sub>. Esta última ruta, actualmente la única habilitada según la normativa ASTM, es la que se consideró en el estudio. El proceso comprende tres etapas principales: la conversión del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub> en gas de síntesis a alta temperatura (reacción inversa de desplazamiento de agua y gas), la transformación de dicho gas en hidrocarburos y la posterior separación y purificación de los productos por destilación.

Por cada kg de hidrógeno utilizado, se obtienen aproximadamente 0,75 kg de combustible de aviación y menores proporciones de diésel y gasolina. Durante la reacción también se genera agua como subproducto, en una proporción cercana a 4,9 kg por cada kilogramo de SAF producido. Esta agua de ser tratada si se decide reutilizar dentro del sistema.

En total, se estima un requerimiento de entre 31 y 42 kg de agua por cada kg de hidrógeno convertido, de los cuales entre 6 y 7 kg corresponden específicamente al agua utilizada para la refrigeración del proceso de conversión. Estos valores consideran el uso de agua proveniente de fuentes superficiales o subterráneas.

# Alternativas de optimización en el consumo de agua



# Alternativas de optimización en el consumo de agua

El agua, que se separa mediante electrólisis para obtener hidrógeno, no constituye un punto de optimización en términos de reducción de consumo. En cambio, al analizar alternativas de mejora en la producción de H<sub>2</sub>V y sus derivados, el foco se centró en los procesos que emplean agua sin transformarla, como los sistemas de refrigeración, a los que se destina la mayor parte del recurso extraído. Por esta razón, las principales oportunidades de optimización se orientan a disminuir el uso de agua en las etapas de enfriamiento.

Una mejor calidad del agua de entrada se traduce en un menor consumo de agua en el proceso. Además, a medida que la tecnología de electrólisis avanza, se espera una mayor eficiencia en la conversión, lo que permitirá disminuir la generación de calor y, en consecuencia, reducir los requerimientos de refrigeración y el uso de agua asociado.

Una alternativa prometedora consiste en implementar sistemas de refrigeración por aire, complementados con agua solo cuando sea necesario. Aunque esta opción implica mayores costos de instalación y operación, es una opción viable y sostenible en Uruguay.

Otra estrategia identificada para reducir el uso de agua en el proceso de refrigeración, es la integración térmica de los procesos, en la que se aprovechan los flujos de calor generados en un proceso del sistema para alimentar otro. Por ejemplo, en la producción de metanol, el calor de salida del reactor puede ser utilizado para precalentar la corriente de ingreso

Adicionalmente, la recuperación y recirculación del agua generada como subproducto en la conversión del hidrógeno a derivados representa una oportunidad para disminuir hasta en un 10 % el consumo de agua de la fuente.

# Proyección de la demanda de agua en la producción de H2V a 2040



# Proyección de la demanda de agua en la producción de H2V a 2040

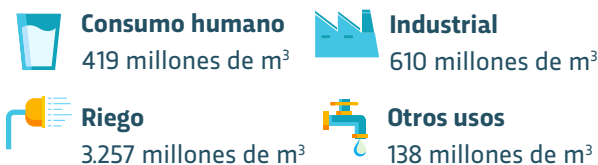
El escenario de producción proyectado para el año 2040, es de 1.000.000 de toneladas de H2V al año, según lo establecido en la estrategia de hidrógeno verde y derivados para Uruguay (*Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde y derivados en Uruguay, MIEM 2023*). En consecuencia, al considerar los valores medios de referencia de IRENA (2023) para fuentes de agua superficiales y subterráneas, se estima que se requerirán las siguientes cantidades de agua:

- Entre 28 y 34 millones de metros cúbicos anuales para cubrir la demanda de tratamiento, electrólisis y refrigeración de los equipos. Esta cantidad representa el volumen total de agua necesario para mantener operativa la infraestructura de producción, asegurando la eficiencia de los procesos y la disipación adecuada del calor generado.
- Aproximadamente 9 millones de metros cúbicos de agua se consumirán, es decir, se transformarán durante la electrólisis y no retornarán de forma inmediata al ciclo hidrológico, sino

que se reincorporarán posteriormente como vapor de agua, a través de procesos como la combustión del hidrógeno o la síntesis de sus derivados.

## Uso del agua en la producción de H2V, comparado con otros usos

El agua es un recurso esencial para múltiples actividades humanas y productivas en Uruguay. Según datos de Dirección Nacional de Aguas (Dinagua) del Ministerio de Ambiente correspondientes al año 2022, los volúmenes anuales de agua habilitados para los principales usos en el país fueron los siguientes:



Se observa que los requerimientos hídricos proyectados hacia el horizonte 2040 para la producción de H2V en Uruguay son entre 28 y 34 millones de m<sup>3</sup>, uno o dos órdenes de magnitud menores que los consumos habilitados para otros usos en 2022. En otras palabras, el volumen de agua estimado para este nuevo sector sería entre 10 y 100 veces menor que el utilizado por actividades tradicionales, como el riego o la industria.

No obstante, es importante tener presente que estos requerimientos se expresan como valores anuales totales, por lo que no reflejan necesariamente las variaciones temporales o geográficas que pueden presentarse.

Si bien el uso de agua para la producción de hidrógeno resulta significativamente menor en comparación con otros sectores, deben considerarse el impacto local y las condiciones específicas del sitio de extracción, así como los posibles efectos en períodos de mayor demanda o menor disponibilidad del recurso.

# Conclusiones sobre el consumo de agua



# Conclusiones sobre el consumo de agua

A partir de los resultados obtenidos, el consumo de agua para la producción de H<sub>2</sub>V se encuentra en el rango promedio de 25 a 35 kgH<sub>2</sub>O/kgH<sub>2</sub>, de los cuales entre 12 y 20 kgH<sub>2</sub>O/kgH<sub>2</sub> corresponden a agua de enfriamiento, lo que representa aproximadamente entre 46 % y 58 % del total.

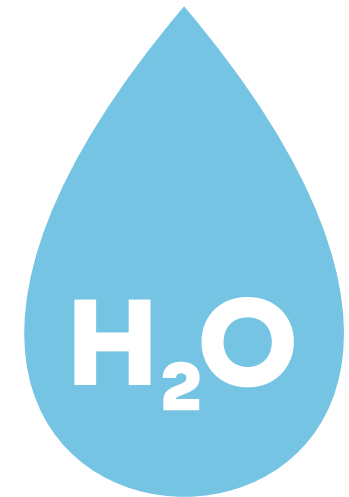
El consumo de agua presenta una alta sensibilidad a la tecnología de electrolizador utilizada. En este sentido, la adopción de electrolizadores PEM en lugar de electrolizadores alcalinos, puede reducir los requerimientos de agua de enfriamiento en torno a un 38 %, lo que mejora la eficiencia hídrica del sistema.

Dado que gran parte del agua total requerida se destina a procesos de refrigeración, otro factor determinante en el consumo de agua del sistema es el nivel de reposición en la torre de enfriamiento, el cual depende de las condiciones atmosféricas (que influyen en la evaporación) y de las características físico-químicas del agua de reposición. Estas últimas inciden en la frecuencia y el volumen de purga necesario para mantener el equilibrio del circuito.

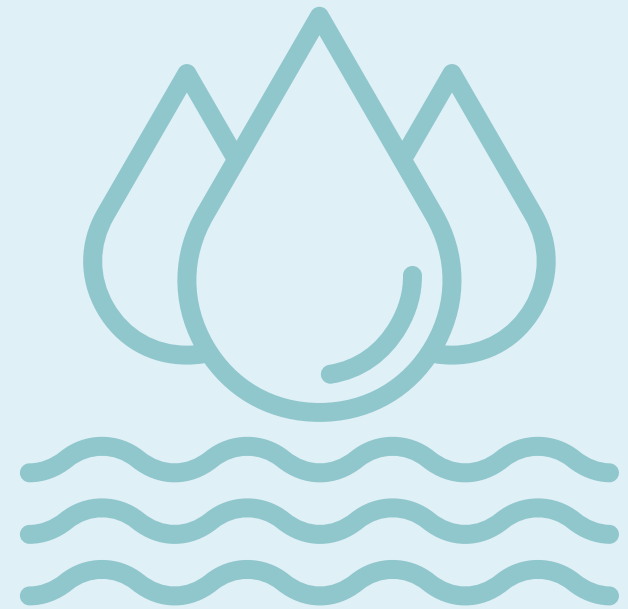
En la producción de metanol, el consumo total de agua se estima entre 30 y 44 kgH<sub>2</sub>O por kg de hidrógeno empleado, de los cuales 20 a 29 kgH<sub>2</sub>O/kgH<sub>2</sub> corresponden al agua de enfriamiento (en la electrolisis alrededor del 60-67 % del total) y 8 a 9 kgH<sub>2</sub>O/kgH<sub>2</sub> al agua de enfriamiento del proceso de conversión (cerca del 20 %).

Expresado por unidad de metanol producido, el consumo equivale a 6-8 kgH<sub>2</sub>O por kilogramo de MeOH, con una distribución proporcional entre los distintos usos del agua.

Para la producción de SAF, se estima un requerimiento total de entre 31 y 42 kg de agua por cada kg de hidrógeno convertido, de los cuales entre 6 y 7 kg corresponden específicamente al agua utilizada para la refrigeración del proceso de producción del SAF.



# Fuentes de agua para los proyectos de H2V



# Fuentes de agua para los proyectos de H2V

Para producir H2V, Uruguay puede recurrir al uso de agua salada y agua dulce. El uso de agua salada en proyectos de hidrógeno y derivados dependerá de la cercanía de los proyectos al mar. Aunque el coeficiente de recuperación de esta se sitúa solamente entre el 40 y 50 %, su disponibilidad en volumen no es limitante. Para el caso de fuentes de agua dulce, estas pueden ser superficiales y subterráneas.

El agua superficial proviene de ríos y embalses. Tiene la ventaja de aportar grandes volúmenes, aunque su disponibilidad varía: aumenta en épocas lluviosas y es más limitada en períodos secos o meses de verano. Para esas condiciones, los proyectos deben prever el uso de fuentes de respaldo, que pueden ser embalses y/o agua subterránea.

## Recurso hídrico superficial

Con el objetivo de identificar las posibles fuentes de agua para la producción de H2V en Uruguay, se realizó una caracterización integral de la disponibilidad del recurso hídrico superficial a nivel nacional.

El análisis contempló dos componentes principales:

- La oferta de agua, estimada a partir de información hidrológica actualizada.
- La demanda actual del recurso, correspondiente a los usos autorizados por Dinagua en un escenario sin proyectos de H2V (escenario de línea de base).

## Información de base y supuestos

El estudio se basó en datos y modelos proporcionados por Dinagua, complementados con una serie de hipótesis que permitieron estimar el comportamiento del recurso en las distintas cuencas.

La oferta hídrica se determinó a partir de los escurrimientos mensuales (mm/mes) generados por el modelo de balance hídrico actualizado al año 2024 para el período 1980–2023, correspondientes a las subcuencas de Nivel 3<sup>1</sup>.

En el caso del río Uruguay, se utilizaron los caudales diarios erogados (vertidos y turbinados) en la represa de Salto Grande para el período 1980–2020, reportados por la Comisión Técnica Mixta (CTM).

---

<sup>1</sup> Con fines de estudio, inventario y gestión de los recursos hídricos, la Dinagua ha establecido una división del territorio con base en las cuencas hidrográficas, mediante un sistema de codificación de tres dígitos: el primer dígito identifica la cuenca principal (6 cuencas principales); el segundo dígito (de 0 a 9) permite identificar hasta diez subcuencas principales en cada cuenca y el tercer dígito (de 0 a 9) permite subdividir cada subcuenca en hasta 10 unidades del curso principal o de cursos afluentes. Por extensión del procedimiento, el sistema de codificación puede desarrollarse todo lo que sea necesario hacia subdivisiones de cuencas de menor extensión. (Fuente: Sección 5.2.1 del Plan Nacional de Aguas, 2017).

La demanda de agua superficial se analizó a partir de los volúmenes anuales otorgados o en estudio por Dinagua entre 2010 y 2023, discriminados por tipo de obra, uso y subcuenca de Nivel 2.

### **Alcance y criterios de análisis**

A los efectos de este estudio, no se incluyeron el río Uruguay ni el Río de la Plata, dado que sus caudales se consideran suficientemente grandes como para no representar una restricción significativa de disponibilidad. En consecuencia, el análisis se centró en las cuencas interiores del país.

El volumen correspondiente a la toma de Aguas Corrientes se redistribuyó proporcionalmente entre las subcuencas aguas arriba, según sus escurrimientos medios anuales.

El grado de estrés hídrico (relación entre la cantidad de agua que se extrae y la cantidad disponible de forma natural la mayor parte del tiempo), se estimó bajo dos escenarios de oferta: una oferta media (P50), equivalente a la mediana de los escurrimientos del período 1980–2023, y una oferta mínima (P5), correspondiente al percentil 5.

De acuerdo a IRENA (2023), el estrés hídrico es:

- bajo: menos del 10 %,
- bajo a medio: entre 10 % y 20 %,
- medio a alto: entre 20 % y 40 %,
- alto: entre 40 % y 80 %,
- muy alto: más del 80 %.

La demanda máxima se definió como el mayor volumen otorgado en cada subcuenca durante el período más reciente (2019–2023).

Finalmente, para el análisis del periodo de estiaje (diciembre–marzo), se asumió que el riego utiliza la totalidad del volumen otorgado en ese cuatrimestre, mientras que los demás usos mantienen una distribución uniforme a lo largo del año, equivalente a un tercio del volumen anual durante ese período.

## Mapas en GIS y resultados y análisis del estrés hídrico

Las figuras 2 y 3 presentan la distribución espacial del escurrimiento mensual (expresado en Hm<sup>3</sup>/mes) para las subcuencas de Nivel 2, al considerar tanto la oferta media (P50) como la oferta mínima (P5) todo el año y en el período diciembre - marzo.

Figura 2: E scorrimento mensual (Hm<sup>3</sup>/mes) para la oferta media y mínima para todo el año

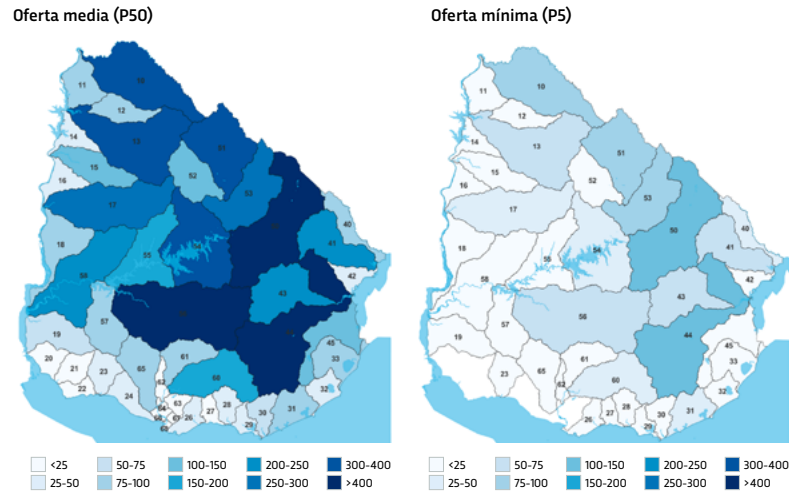


Figura 3: E scorrimento mensual (Hm<sup>3</sup>/mes) para la oferta media y mínima para Dic-Mar

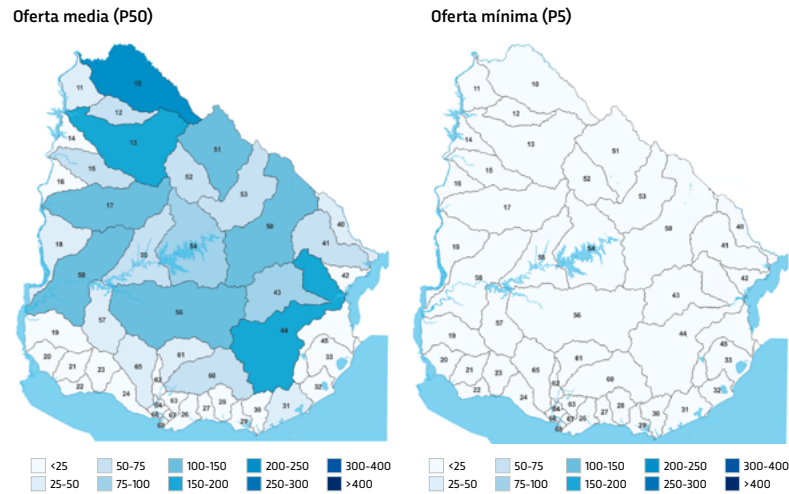
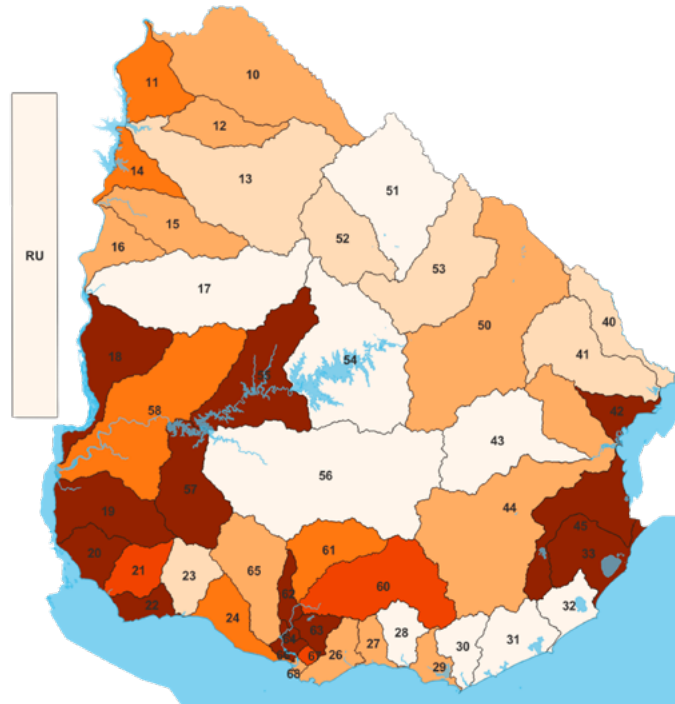


Figura 4: Mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta media (izquierda) y mínima (derecha) para todo el año

Oferta media (P50)



Oferta mínima (P5)



Se construyeron dos mapas de estrés hídrico para el caso anual y Dic-Mar respectivamente:

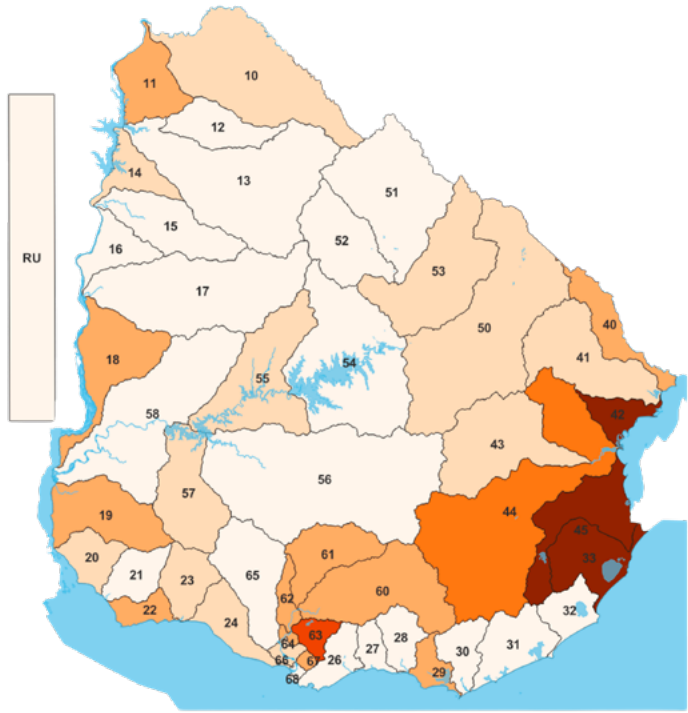
- Demanda máxima / Oferta media
- Demanda máxima / Oferta mínima

Para la escala de colores se empleó la clasificación propuesta por IRENA (2023)

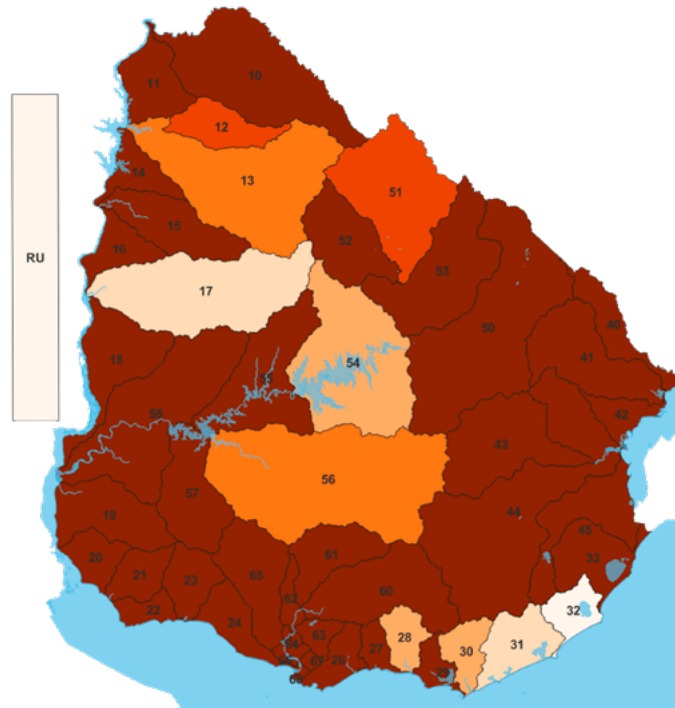
En la Figura 4 se presentan los mapas de estrés hídrico calculados a partir de la demanda máxima actual y de los escenarios de oferta media (panel izquierdo) y oferta mínima (panel derecho) para todo el año. Los resultados correspondientes al Río Uruguay se indican con un rectángulo identificado como RU, y los códigos de cada subcuenca de Nivel 2 se muestran en negrita.

Figura 5: Mapas de estrés hídrico obtenidos a partir de la demanda máxima y la oferta media (izquierda) y mínima (derecha) para el cuatrimestre Dic-Mar

Oferta media (P50)



Oferta media (P5)



De manera análoga, la Figura 5 presenta los mapas de estrés hídrico obtenidos al considerar la oferta media (P50) durante el cuatrimestre diciembre-marzo (estiaje), período crítico por su menor disponibilidad de agua.

A escala de subcuenca, los resultados evidencian la importancia de considerar la variabilidad temporal y espacial de la oferta de agua. Se identifica que varias cuencas superficiales sufren escasez hídrica con las demandas y variabilidad climática actual y no soportan más presión sobre el recurso, sobre todo en estiaje.

Por otro lado, los resultados correspondientes a la oferta media (P50) muestran que algunas cuencas aún presentan margen para incorporar nuevas demandas, aunque cada caso deberá analizarse individualmente para asegurar la sostenibilidad del recurso.

### Escenario de producción de H2V

En esta sección se presentan los resultados de las comparaciones globales entre la oferta y la demanda de agua superficial para dos escenarios de demanda asociados a proyectos de H2V:

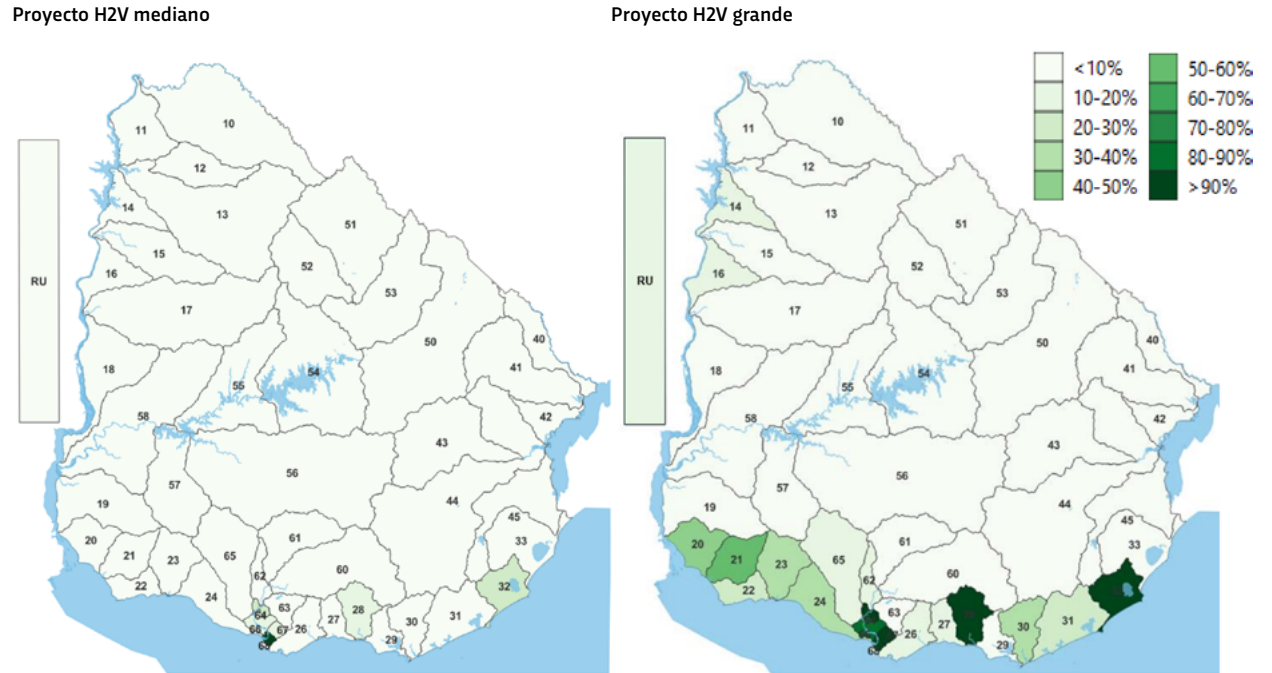
- **Proyecto de escala mediana:** toma de agua aproximada de 1.000 m<sup>3</sup>/día.
- **Proyecto de escala grande:** toma de agua aproximada de 7.000 m<sup>3</sup>/día.

La metodología empleada para elaborar los mapas de estrés hídrico es equivalente a la descrita en la sección anterior. En cada subcuenca de Nivel 2 se incorporó la demanda del proyecto de H2V correspondiente, adicionándola a la demanda actual (1.000 o 7.000 m<sup>3</sup>/día, según el tipo de proyecto).

En el caso del río Uruguay, dado que la oferta de agua en esta cuenca es considerablemente mayor, se consideró una demanda equivalente a 10 proyectos de H2V de la escala correspondiente.

Asimismo, se elaboraron mapas de “ratio de demandas”, definido como el cociente entre la demanda del proyecto de H2V y la demanda actual del recurso hídrico en cada subcuenca de Nivel 2 (correspondiente a la demanda máxima registrada en los últimos cinco años disponibles).

Figura 6: Mapas de ratios de demanda para un proyecto de H2V de escala mediana (izquierda) y grande (derecha) para todo el año



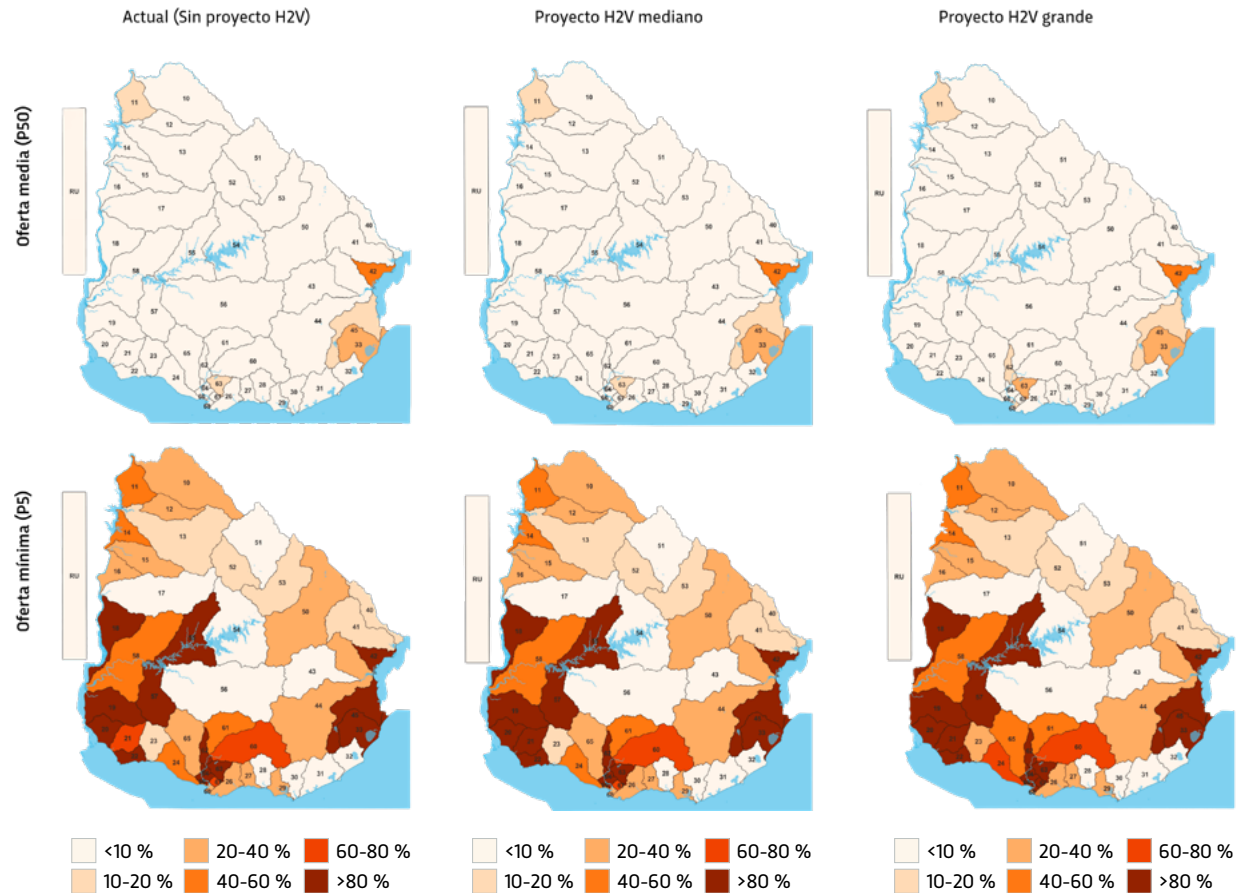
Las demandas máximas de agua actualmente autorizadas se basan en la disponibilidad del recurso hídrico en cada cuenca, la que depende principalmente de su tamaño y capacidad de oferta. Para evaluar el impacto potencial de los proyectos de H2V se consideraron los escenarios de consumo de agua antes mencionados, aplicados de manera uniforme a todas las cuencas.

Debido a esta aplicación homogénea, en las cuencas de menor superficie el consumo estimado representa una proporción mayor respecto de su disponibilidad de agua, lo que se refleja en ratios de demanda más elevados. Sin embargo, en términos generales, en la mayoría de las subcuencas, la demanda adicional asociada a los proyectos de H2V equivale a menos del

10% de las demandas máximas ya existentes, salvo para algunas cuencas costeras de superficie pequeña.

Los resultados de los mapas de estrés hídrico (Figura 7) muestran que la incorporación de un proyecto de H2V, tanto de escala mediana como grande, no genera variaciones significativas en el nivel de estrés hídrico respecto de la situación actual, lo que sugiere una baja incidencia de este tipo de proyectos sobre la disponibilidad general del recurso. El mismo análisis se realizó para condiciones de estiaje y se encuentra visible en el documento original.

**Figura 7: Comparación de los mapas de estrés hídrico para todo el año en la situación actual y al agregar un proyecto de H2V de escala mediana/grande a la demanda actual**



## **Recurso hídrico subterráneo**

El análisis de las fuentes de agua subterránea es de importancia para el desarrollo de la industria del H2V en Uruguay. Si bien el aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales se considera la opción principal, su oferta presenta una notable variabilidad, especialmente durante los períodos de estiaje, cuando los caudales superficiales tienen menor oferta y mayor demanda por otras actividades productivas. Esta variabilidad representa un riesgo operativo para la producción industrial de H2V, que requiere un suministro de agua constante y predecible. Al poder recurrir a pozos durante los períodos en que la toma directa de un río no es viable, se garantiza la continuidad del suministro al electrolizador.

### **Agua subterránea en Uruguay**

Uruguay presenta un relieve suave, resultado de formaciones geológicas muy antiguas, donde predominan rocas ígneas y metamórficas expuestas en superficie, junto con sedimentos derivados de procesos de erosión o depósitos eólicos y fluviales. Estas condiciones favorecen la existencia de acuíferos, entendidos como formaciones geológicas que almacenan agua y permiten su transmisión, de manera que pueda ser aprovechada como recurso. En Uruguay, solo el 35 % de los acuíferos en superficie son sedimentarios. Estos

están compuestos principalmente por arenas, areniscas y gravas, con variaciones en el contenido de arcilla y limo, y son los que aseguran continuidad espacial y temporal suficiente para la explotación de agua.

En el marco de este estudio, la extensión de los registros sedimentarios se considera la variable principal para definir los acuíferos con capacidad de garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo.

A modo de referencia, sobre el nivel de productividad de los acuíferos en Uruguay, se estima que los caudales extraídos en las obras de mayor rendimiento no superan, en general, los 50 m<sup>3</sup>/h.

Debido a las particularidades de los recursos hídricos subterráneos, la información disponible es limitada y solo algunos acuíferos han sido estudiados con mayor detalle.

### **Información disponible para el análisis**

Dinagua es la autoridad competente en Uruguay para otorgar permisos y concesiones de derecho de uso de agua, así como permisos de estudio previos a la perforación de obras destinadas a la extracción de agua subterránea. Los permisos de uso de agua pueden extenderse hasta por 10 años, con posibilidad de renovación al vencimiento, de acuerdo al tipo de obra y la fecha de su autorización.

El banco de datos utilizado para la elaboración del informe fue provisto por Dinagua a través del Sistema de Información Hídrica (SIH). Este registro, vigente al 5 de marzo de 2024, contiene 3.147 obras de agua subterránea, de las cuales 3.131 corresponden a pozos y 16 a manantiales. Dentro del total, 198 pozos pertenecen a Obras Sanitarias del Estado (OSE). De acuerdo con información oficial, existe un subregistro estimado entre 10 % y 15 % en los datos disponibles.

### **Disponibilidad de agua subterránea**

La posibilidad de disponer de agua prácticamente en todo el territorio proporciona una seguridad adicional en cualquier proyecto. Sin embargo, para evaluar acertadamente la oferta, deben considerarse también la cantidad disponible, la calidad del recurso y los volúmenes comprometidos previamente.

Siguiendo el criterio utilizado para el análisis de aguas superficiales, se relevó la distribución de pozos dentro de las cuencas geográficas de Nivel 1, sin considerar el acuífero específico al que pertenecen. Este enfoque permite evaluar la disponibilidad de agua subterránea y su potencial complementariedad con los recursos superficiales. Para ello, se consideraron las seis principales cuencas hidrográficas: Río Uruguay, Río de la Plata, Océano Atlántico, Laguna Merín, Río Negro y Río Santa Lucía.

## Disponibilidad de agua subterránea por cuenca hidrográfica

En la Tabla 3 se reúne la cantidad de agua subterránea comprometida por permisos gestionados y otorgados en vigencia, así como los derechos de uso vigentes correspondientes a OSE para abastecimiento humano.

**Tabla 3: Caudal autorizado en cuencas hidrográficas Nivel 1**

Cuenca	Caudal [m³/h]	Caudal OSE [m³/h]
Río Uruguay	7590	345
Río de la Plata	11126	110
Océano Atlántico	768	112
Laguna Merín	794	117
Río Negro	3200	300
Río Santa Lucía	6036	494

En el análisis de aguas subterráneas, un primer paso para estimar el potencial del recurso consiste en evaluar la producción de los pozos existentes. Se considera que los proyectos de H2V de menor escala demandan en promedio 10 m³/h, y considerando que los pozos rara vez alcanzan su producción nominal, se adoptó un

umbral de interés de 15 m³/h (equivalente a 4,2 L/s) para identificar obras de captación relevantes. Este umbral resulta adecuado por encontrarse por debajo de los 20 m³/h, que constituye aproximadamente el límite máximo aforable con compresor en un pozo estándar de 6 pulgadas.

Un proyecto pequeño puede ser abastecido por un solo pozo que cumpla con estas condiciones, mientras que proyectos de mayor escala requerirán baterías de pozos o la combinación del recurso subterráneo con otras fuentes. En todos los casos, las obras deberán garantizar caudales sostenibles y evitar impactos sobre las reservas del acuífero.

## Potencial complementario

Para el análisis del proyecto, no importa demasiado qué subdivisión se adopta, sino otras variables: el lugar geográfico que representa (variedad de caudales), las posibilidades de agua subterránea segura, la profundidad a la que se encuentra y los costos de extracción. Todo esto determinará qué complementariedad puede asegurar en un proyecto de producción de H2V a la disponibilidad evaluada en una cuenca superficial. Luego de obtener estos datos en la subdivisión por cuencas superficiales, se deberá ir a la subcuenca y recién más tarde al acuífero o formación para evaluar el remanente disponible para el proyecto, en caso de tener restricciones para su uso por reservas al abastecimiento de poblaciones.

## Evaluación de recurso hídrico subterráneo en unidades hidrogeológicas

Para organizar la información de pozos y manantiales utilizada en este informe, se elaboró un mapa basado en la Carta Hidrogeológica de Uruguay a escala 1:2.000.000, elaborada por la Dirección Nacional de Minería y Geología (Dinamige) en 1986. Este mapa representa las unidades hidrogeológicas consideradas en el análisis.

**Figura 8: Mapa Hidrogeológico de Ocurrencia de Aguas Subterráneas (Modificado de Dinamige, 1986)**



En general, los acuíferos de Uruguay no cuentan con estudios integrales, y solo algunos han sido analizados específicamente para conocer sus características, por tanto, el conocimiento que se tiene del recurso hídrico subterráneo en nuestro país, actualmente, es menor que el de las cuencas superficiales.

El Sistema Acuífero Raigón (SAR) es el más estudiado, con modelaciones numéricas detalladas, realizadas por distintos investigadores desde 1996. Gracias a estos estudios, es posible estimar con cierto grado de confianza la recarga disponible, calculada en aproximadamente 3 m<sup>3</sup>/s (95 hm<sup>3</sup>/año). Estudios adicionales en subcuencas del SAR mediante el programa Visual Balan confirman valores de recarga similares.

El Sistema Acuífero del Litoral Sur (SALS) también ha sido objeto de análisis, lo que incluye etapas de pre-modelación numérica. La recarga máxima obtenida mediante Visual Balan varía entre el 8 % y el 11 % de la precipitación anual, lo que permite estimar una recarga aproximada de 10 m<sup>3</sup>/s (314 hm<sup>3</sup>/año) para el acuífero.

En cuanto al Sistema Acuífero Guaraní (SAG), la recarga útil total se estima en 6 km<sup>3</sup>/año, y si se considera la superficie aflorante en Uruguay, se adopta un valor aproximado de 15 m<sup>3</sup>/s (473 hm<sup>3</sup>/año) para fines de planificación y estimaciones de disponibilidad.

Estas estimaciones de recarga son tentativas y dependen del grado de conocimiento y mediciones sistemáticas de las variables involucradas.

A los efectos de esta síntesis, se consideran tres acuíferos sedimentarios prioritarios:

1. Sistema Acuífero Guaraní
2. Sistema Acuífero Raigón
3. Acuífero Mercedes (Cretácicos del Oeste)

### Sistema Acuífero Guaraní (SAG)

Área: 40.032 km<sup>2</sup>

Volumen autorizado por Dinagua (2024): 11,8 hm<sup>3</sup>

Recarga estimada: 473 hm<sup>3</sup>/año

Obras declaradas: 106, de las cuales 16 son pozos infrabasálticos

Caudal promedio: 19 m<sup>3</sup>/h; máximo: 210 m<sup>3</sup>/h

Usos principales: agropecuario (62)<sup>2</sup> e industrial (21)

Observaciones: el 23 % de las obras supera el umbral de caudal definido en este informe. Se cuenta con información estratigráfica de 381 perforaciones para diferenciar el Guaraní aflorante, infrabasáltico y las formaciones Arapey/Salto-Arapey, dada su importancia estratégica para proyectos.

<sup>2</sup> Los valores entre paréntesis corresponden a la cantidad de pozos registrados para cada tipo de uso.

### Sistema Acuífero Raigón

Área: 2.262 km<sup>2</sup>

Volumen autorizado por Dinagua (2024): 25,3 hm<sup>3</sup>

Recarga estimada (De los Santos et al., 1997): 95 hm<sup>3</sup>/año

Obras declaradas: 361 pozos y manantiales

Caudal promedio: 23 m<sup>3</sup>/h; máximo: 118 m<sup>3</sup>/h

Uso principal: riego (168) e industrial (78)

Observaciones: el 56 % de las obras supera el umbral de caudal definido en este informe.

### Cretácicos del oeste (acuífero Litoral Sur)

Área: 16.675 km<sup>2</sup>

Volumen autorizado por Dinagua (2024): 10,5 hm<sup>3</sup>

Recarga estimada (De los Santos et al., 2020): 315 hm<sup>3</sup>/año

Obras declaradas: 310 pozos y manantiales con caudal operativo

Caudal promedio: 9 m<sup>3</sup>/h; máximo: 75 m<sup>3</sup>/h

Usos principales: agropecuario y otros usos

Observaciones: el 14,5 % de las obras supera el umbral de caudal definido para este estudio. La unidad cuenta con caracterización geohidrológica exhaustiva y pre-modelación matemática, lo que permite afirmar que es adecuada para proyectos de pequeño y mediano porte.

## Escenarios de producción de H2V

Para este análisis, se consideran tres escenarios de producción de H2V según la escala de toma de agua:

- Pequeña: ~200 m<sup>3</sup>/d
- Mediana: ~1.000 m<sup>3</sup>/d
- Grande: ~7.000 m<sup>3</sup>/d

Los proyectos de escala pequeña y mediana podrían abastecerse sin dificultad en todos los acuíferos analizados. Para proyectos de gran escala, el abastecimiento es factible en el Acuífero Guaraní, mientras que en los Cretácicos del Oeste y el Acuífero Raigón podría ser necesario recurrir a una batería de pozos para cubrir la demanda. En todos los casos, se calcula el estrés hídrico asociado a cada tipo de proyecto y acuífero seleccionado.

## Estrés hídrico en acuíferos prioritarios

Con los datos de volúmenes autorizados vigentes hasta la fecha de este informe, se calculó el estrés hídrico en las unidades hidrogeológicas en las que existe un valor de recarga anual analizado.

Además, la tabla 5 muestra el número máximo de proyectos de H2V de gran escala que podrían desarrollarse en cada acuífero, en un escenario en el que la demanda de agua se duplique (100 % de aumento), y sin superar un estrés hídrico del 40 %, valor que representa el límite superior del rango medio a alto según IRENA (2023).

Este análisis se realiza a escala de acuífero y no considera posibles restricciones o impactos a nivel local. Una vez identificado cada proyecto, será necesario llevar a cabo estudios locales para confirmar la disponibilidad de agua y gestionar la correspondiente autorización ante Dinagua.

Tabla 4: Estrés hídrico 2024

Acuífero	Vol. autorizado 2024 [hm <sup>3</sup> /año]	Recarga [hm <sup>3</sup> /año]	Estrés hídrico 2024
Guaraní	13,6	473	3 %
Raigón	29,1	95	31 %
Cretácicos del Oeste	12,1	315	4 %

Tabla 5: Proyectos de H2V de escala grande necesarios para alcanzar un valor de estrés hídrico del 40 % en un escenario de aumento del 100 % de la demanda

Unidad hidrogeológica	N.º de proyectos de hidrógeno	Estrés hídrico
Sistema Acuífero Guaraní	63	40 %
Sistema Acuífero Raigón	0	61 %
Sistema Acuífero Cretácicos del Oeste	39	40 %

# Conclusiones y recomendaciones



# Conclusiones y recomendaciones

Los estudios concluyen que la producción de H2V no implica un uso del agua distinto ni más intensivo que el de otros sectores industriales existentes. Por tanto, no se justifica una política diferencial en la autorización de concesiones de agua.

Los resultados de los mapas de estrés hídrico (Figuras 7 y 8) muestran que la incorporación de un proyecto de H2V, tanto de escala mediana como grande, no genera variaciones significativas en el nivel de estrés hídrico respecto de la situación actual, lo que sugiere una baja incidencia de este tipo de proyectos sobre la disponibilidad general del recurso.

Las solicitudes deberán continuar evaluándose bajo los procedimientos habituales de Dinagua, considerados suficientes para garantizar la protección del recurso.

Sin embargo, se plantean algunas recomendaciones puntuales para fortalecer la gestión:

- **Embalses:** la demanda potencial del H2V no generaría presión significativa sobre el recurso. Las autorizaciones deberían seguir los mismos criterios aplicados a otros aprovechamientos, especialmente de riego.
- **Tomas superficiales:** se propone ajustar los criterios de adjudicación considerando la disponibilidad estacional. Las demandas industriales, como el H2V, podrían tener mayor flexibilidad fuera del verano y mayores restricciones en época estival, para reservar el recurso para usos zafrales. Se sugiere además revisar el criterio actual de otorgamiento cronológico, con la incorporación de prioridades según tipo de uso y estacionalidad.
- **Pozos subterráneos:** se recomienda mantener los requisitos técnicos actuales y, adicionalmente, proteger los acuíferos someros utilizados por pequeños productores y usuarios rurales. Para ello, los proyectos industriales deberían captar agua de capas más profundas, evitando competencia con usos locales.

# Anexo



## Estudios de caso

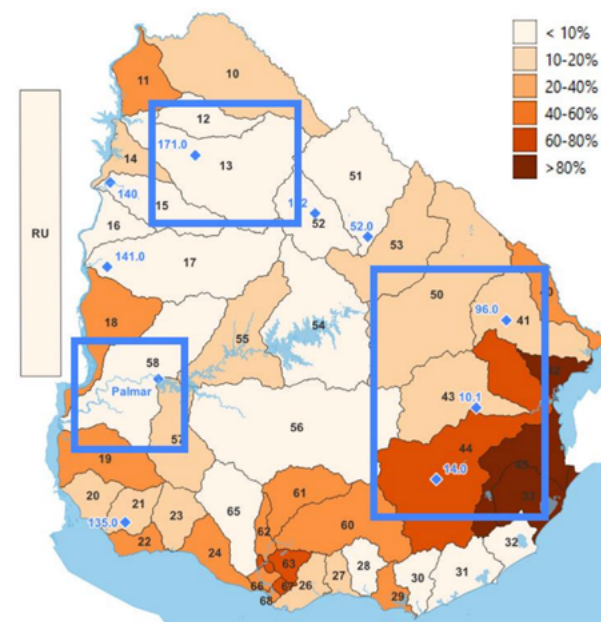
Los estudios de caso incorporan un análisis detallado de la confiabilidad del recurso hídrico frente a nuevas demandas, mediante la aplicación del Método del Nivel Umbral (*Threshold Level Method*). Este enfoque permite identificar y caracterizar los períodos en que el caudal disponible se encuentra por debajo de un nivel de referencia o demanda específica, al definir indicadores de falla que describen su frecuencia, duración y volumen. La evaluación de los períodos de falla permite planificar el uso del recurso hídrico y la combinación de fuentes, para asegurar el abastecimiento.

Se evalúan tres casos de producción de H2V y derivados a gran escala (toma de agua de aproximadamente 7.000 m3/d), que se toman de distintas fuentes de agua: superficial, subterránea, embalses o una combinación de las anteriores.

- **Arapey alto (subcuenca 13):** Complementariedad entre agua subterránea (extraída del Acuífero Guaraní) y una toma directa superficial del río Arapey, con caso límite sólo extracción de agua subterránea.
- **Laguna Merín (subcuencas 41, 43 y 44):** Complementariedad entre una toma directa superficial y un embalse, con caso límite sólo embalse.
- **Palmar (subcuenca 58):** Toma directa superficial en el río Negro, aguas abajo de la represa de Palmar, con un pólder (embalse artificial llenado por bombeo) para sortear los periodos secos.

Se destaca que, en todos los casos, se asume que durante el proceso de producción de H2V el abastecimiento de agua al electrolizador debe de ser continuo, y por lo tanto se busca asegurar falla cero o que en caso de fallas de abastecimiento se tenga una fuente de agua complementaria.

Figura 9: Distribución espacial de los casos de estudio seleccionados sobre el mapa de estrés hídrico obtenido a partir de la demanda máxima y la oferta media para el cuatrimestre Dic-Mar agregando un proyecto de H2V de escala grande a la demanda actual



## **Estudio de caso Arapey alto**

El estudio de Arapey Alto analiza la complementariedad entre el agua subterránea (extraída del Acuífero Guaraní) y una toma directa superficial del río Arapey alto, considerando como caso límite la satisfacción de la demanda de H2V exclusivamente a partir de agua subterránea. La operación del sistema está diseñada de manera que el agua subterránea solo se utiliza cuando el río no alcanza a cubrir la demanda del proyecto (0,081 m<sup>3</sup>/s) y el caudal ambiental<sup>3</sup>. La cuenca de aporte considerada para la toma superficial es de 500 km<sup>2</sup>, mientras que la subcuenca total del río es de 6.932 km<sup>2</sup>.

Los resultados históricos muestran que, en un 80 % de los días, el caudal del río Arapey es suficiente para cubrir la demanda, sin necesidad de recurrir al acuífero. En el 5 % de los días, se presenta un déficit que requiere el uso del agua subterránea como fuente complementaria y en aproximadamente el 15 % del total del año, el acuífero debe cubrir la totalidad de la demanda, ya que el río se encuentra en su caudal mínimo ambiental.

<sup>3</sup>. Cantidad mínima de agua que debe permanecer en los cursos superficiales como ríos y arroyos, para garantizar el funcionamiento de los ecosistemas naturales.

El déficit anual máximo registrado fue de 1,6 Hm<sup>3</sup>, lo que representa menos de la mitad del consumo anual de un proyecto de H2V de gran escala (2,5 Hm<sup>3</sup>/año). La disponibilidad de subcuencas sin tomas existentes y la metodología de cálculo del caudal ambiental q80 sugieren que no habría restricciones significativas para nuevas autorizaciones de toma de agua en la zona.

## **Estudio de caso Laguna Merín**

El estudio de Laguna Merín analiza la complementariedad entre una toma directa superficial en el río Tacuarí y un embalse, considerando como caso límite la satisfacción de la demanda de H2V exclusivamente a partir del embalse. El sistema está diseñado para que el embalse solo se utilice cuando el caudal del río no sea suficiente para cubrir la demanda de un proyecto de H2V de gran escala (0,081 m<sup>3</sup>/s) y el caudal ambiental.

El análisis mostró que, si se considera únicamente el embalse, el volumen mínimo necesario para asegurar falla cero depende del área de la cuenca de aporte, alcanzando un valor óptimo de 2,1 Hm<sup>3</sup> para una cuenca de 9,6 km<sup>2</sup>. Al combinar el embalse con la toma directa, se reduce el tamaño necesario del embalse a 1,5 Hm<sup>3</sup>, ya que el río contribuye directamente a cubrir la demanda. La cuenca de aporte considerada para la toma directa es de 500 km<sup>2</sup>, mientras que la cuenca total del río Tacuarí en la estación analizada es de 1.425 km<sup>2</sup>.

Esta combinación de embalse y toma directa es viable y permite optimizar el tamaño de la infraestructura, manteniendo falla cero. Además, la disponibilidad de subcuencas sin tomas existentes facilita la implementación de nuevas autorizaciones de extracción de agua, aunque la presencia de tomas existentes, como la de OSE en la ciudad de Melo, puede limitar la asignación en ciertas áreas.

## **Estudio de caso Palmar**

El estudio de Palmar analiza un modelo de abastecimiento que combina una toma directa en el río Negro con un pólder (embalse artificial llenado por bombeo) para cubrir los períodos secos. El sistema se diseñó para que el pólder solo se utilice cuando el río no alcance a cubrir la demanda de un proyecto de H2V de gran escala (0,081 m<sup>3</sup>/s).

El análisis histórico mostró que existen períodos prolongados con caudal nulo en el río, la racha más larga fue de 45 días consecutivos sin caudal. El déficit hídrico máximo registrado en los 30 años de análisis fue de 0,315 Hm<sup>3</sup>, valor que determina el tamaño necesario del pólder para asegurar falla cero.

La combinación de toma directa y pólder es viable y permite garantizar el suministro de agua incluso durante sequías prolongadas.

# Evaluación y perspectivas del uso del agua para la producción de hidrógeno verde y derivados en Uruguay



Ministerio  
de Industria,  
Energía y Minería



MEM Transforma



BANCO DE DESARROLLO  
DE AMÉRICA LATINA  
Y EL CARIBE