



## Informe técnico de estudio

### ¿Decaen las reservas hídricas de los suelos en Argentina?

#### El veredicto de satélites, algoritmos y grandes números.

*Are soil moisture reserves declining in Argentina?*

*The verdict from satellites, algorithms, and big-data analysis*

Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria

Viglizzo, Ernesto Francisco

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4066-7216>

#### Autor para correspondencia:

Correo electrónico: [eviglizzo@gmail.com](mailto:eviglizzo@gmail.com)  
(Viglizzo, Ernesto)

#### Resumen

En coincidencia con patrones declinantes de almacenaje de agua en suelos de Sudamérica, detectados previamente por varios autores, en este estudio se demuestra que los patrones de almacenamiento hídrico también declinaron de manera significativa, tanto en el Norte, como en el Centro y Sur de Argentina durante el primer cuarto del siglo 21. En algunas ecorregiones esa caída fue extrema, pero también ocurrieron algunas pocas excepciones con ganancia o estabilización del patrón hídrico.

**Palabras clave:** Hidrología en suelos, reservas de agua, declinación hídrica, desvíos de la media

#### Abstract

In line with declining soil water storage patterns in South America, previously observed by several authors, this study demonstrates that water storage patterns also declined significantly in northern, central, and southern Argentina during the first quarter of the 21st century. In some ecoregions, this decline was extreme, but there were also a few exceptions with gains or stabilization of the water pattern.

**Keywords:** Soil hydrology, water reserves, water decline, deviations from the mean, spatial scales

#### Resumen Ejecutivo

¿Pierden nuestros suelos capacidad para almacenar agua? ¿Se agudiza este fenómeno en el siglo 21 a raíz del calentamiento global o por acción humana? El agua es hoy un recurso estratégico, con implicancias geopolíticas, equivalente a la energía, los alimentos, la infraestructura o la tecnología. Es particularmente importante en países que producen alimentos y juegan un rol en la seguridad alimentaria global. Su gestión influye en los acuerdos internacionales o interregionales, y en la prevención de conflictos de jurisdicción.

La producción agropecuaria depende de la humedad del suelo, de sus reservas subterráneas, y de la disponibilidad de agua para consumo animal o para riego. Esto es y será relevante en las extensas regiones semiáridas y áridas de Argentina, en las cuales pequeñas variaciones en la disponibilidad de agua pueden producir grandes cambios productivos. Los cambios de masas de agua pueden convertirse en indicadores de alerta temprana, ya que un cambio de tendencia puede disparar crisis hídricas momentáneas o permanentes.

Algunas preguntas de importancia crítica en varias regiones de Argentina son inevitables ¿La región acumula agua o agota sus reservas? ¿Sus acuíferos se recuperan o degradan? ¿Las sequías son episódicas o estructurales? ¿Existe riesgo latente de inundaciones? ¿Ocurren cambios asociados al clima? Una región que detecta cambios persistentes de tendencia puede actuar antes de convertirse en crisis. Existen patrones hidrológicos regionales de largo plazo que es necesario dilucidar y entender para tomar decisiones fundadas en el conocimiento científico.

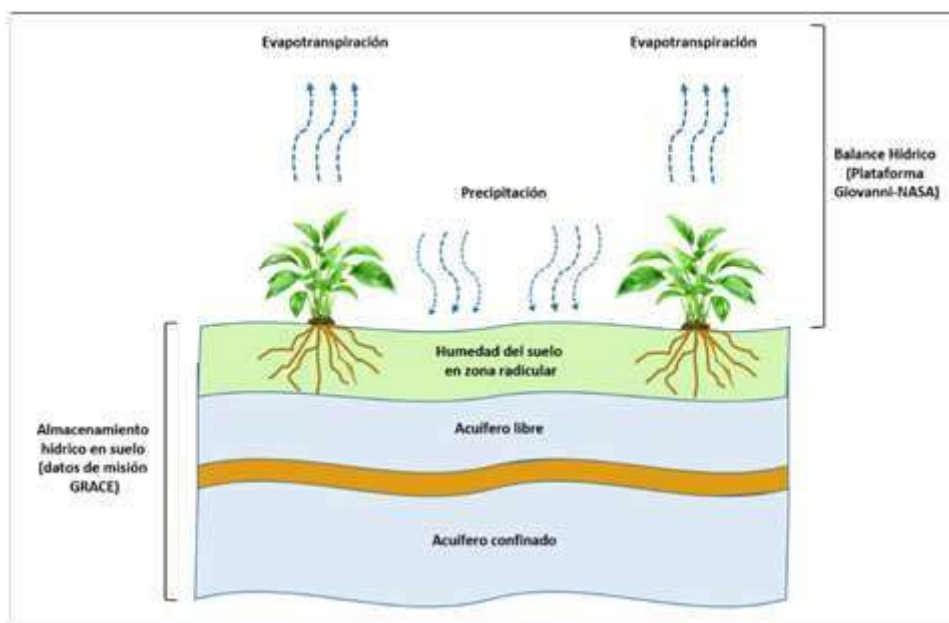
Estudios científicos recientes, basados en datos satelitales y modelos, han mostrado una disminución significativa en el almacenamiento de agua en los suelos de Sudamérica durante el cuarto de siglo 2000-2025. Sequías más intensas y frecuentes, calentamiento atmosférico y sobre-explotación de acuíferos explicarían el fenómeno. ¿Muestran los datos de almacenamiento de agua en los suelos de Argentina una tendencia similar? Las reservas de agua son un componente esencial del sistema hidrológico-terrestre porque actúa como un amortiguador que regula el balance hídrico entre los flujos de entrada (principalmente, precipitación) y los flujos de salida (evaporación, transpiración, drenaje).

Desde una perspectiva científica es necesario diferenciar los estudios hidrológicos puntuales o sitio-específicos, de los estudios regionales que abordan escalas espaciales y temporales mucho mayores. Los primeros son generalmente son el producto de sensores (de reflectometría o gravimetría) colocados en un sitio determinado que permiten monitorear en tiempo real variaciones de humedad en el suelo. Los segundos exploran extensas áreas geográficas y largas series temporales, y recurren a plataformas satelitales, modelos de superficie y análisis de grandes números (big-data analysis). Como ejemplos tenemos las prestaciones satelitales de la Misión GRACE de la NASA y la Agencia Aeroespacial Alemana, y la cuantificación de variables en sistemas hidrológicos modelados como GLDAS, de la plataforma Giovanni de la NASA.

Las dos herramientas (la local y la regional) no se excluyen entre sí, sino que se complementan y ofrecen un cuadro completo de información a escalas diferentes. El enfoque espacial le da un contexto hídrico de región al sitio y permite validar la representatividad de ese sitio a escala regional.

Dada la existencia de datos hídricos locales aportados por redes y parcelas de experimentación, la propuesta de este estudio es complementar esa información con datos que reflejen lo que ocurre cuando se exploran extensas escalas geográficas.

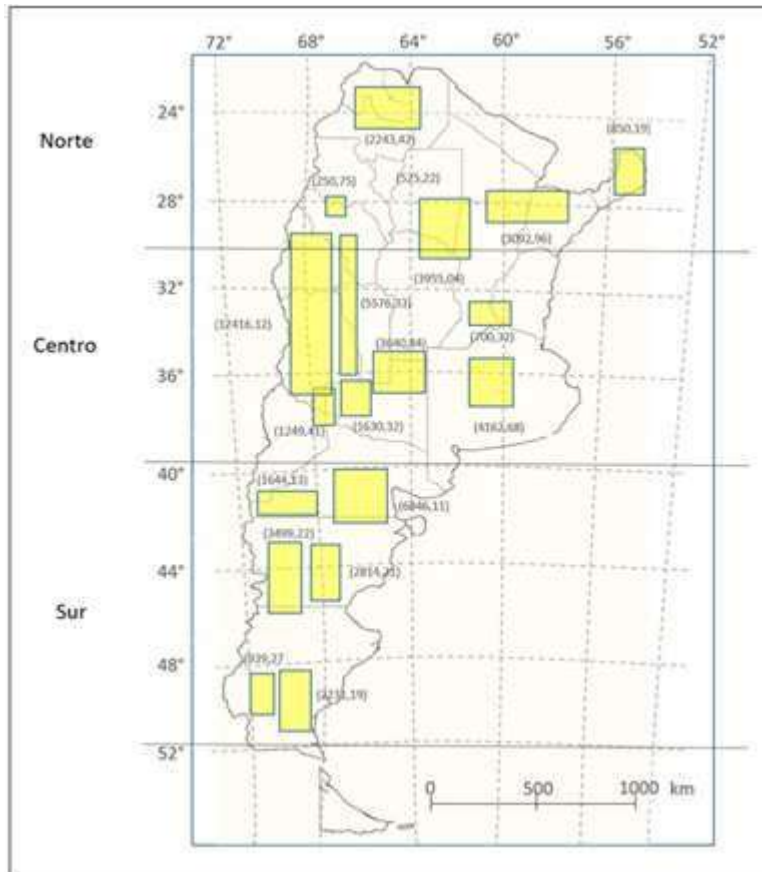
Como se muestra en el esquema simplificado de la Figura 1, en el estudio se analizaron los promedios de almacenaje hídrico y sus tendencias según los datos de la plataforma Giovanni de la NASA y de la misión satelital GRACE.



**Figura 1.** Esquema simplificado de los componentes climáticos e hídricos evaluados en este estudio.

En paralelo se estudiaron las tendencias de temperatura, precipitación, evaporación y transpiración, balance hídrico, humedad en zona radicular del suelo y las señales de cambio de los acuíferos subterráneos. Las tendencias y los patrones de cada región (Norte, Centro y Sur) fueron estimadas a través del período 2002-2024. Si bien los modelos GLDAS del proyecto Giovanni-NASA proveen datos hídricos absolutos en intervalos conocidos de tiempo, apoyado en la misión GRACE una de las finalidades centrales de este estudio apunta a detectar tendencias de cambio relativo en el largo plazo.

El período analizado en este trabajo se corresponde con la etapa crítica de retracción hídrica el primer cuarto del siglo 21 en Sudamérica. La investigación alcanzó a 18 ecorregiones localizadas a distintas latitudes y longitudes de Argentina (Figura 2) procurando representar regiones relevantes de Argentina. La ecorregión fue aquí definida como una unidad geográfica extensa, caracterizada por condiciones ambientales (clima, geomorfología, suelo, flora, y fauna) funcionalmente homogéneas, e independientes de los límites creados por el hombre. Las ecorregiones evaluadas suman alrededor de 58 millones de hectáreas, lo cual representa aproximadamente un 15 % del área territorial del país, excluyendo montañas y regiones con hielo permanente.



**Figura 2.** Localización geográfica aproximada de las ecorregiones analizadas en el Norte, Centro y Sur de Argentina. Entre paréntesis se indica el número de hectáreas analizadas (multiplicadas x 1000) en cada ecorregión. Los valores climáticos y hídricos analizados corresponden a una media de la superficie total de cada ecorregión. El análisis involucró un total 57.742.521 hectáreas.

Las ecorregiones se ordenaron en grandes espacios territoriales que se identificaron aquí como **regiones Norte, Centro y Sur**. O sea, el estudio abarcó dos escalas de análisis: la ecorregión y la gran región. En la **región Norte** se localizan las ecorregiones denominadas NEA Selva Paranaense, NEA Chaco Húmedo, NOA Alto Andina, NOA Desértica y Chaco Semiárido. La **región Centro** alberga las ecorregiones denominadas Pampa Húmeda, Pampa Subhúmeda, Pampa Semiárida, Pampa Desértica, Pampa Agrícola, Cuyo Sub-andino y Cuyo Desértico. La **región Sur** contiene las regiones Subandinas y Desérticas de Patagonia Norte, Patagonia Centro y Patagonia Sur. En total, se conformó y analizó una base de  $\approx 118.000$  datos.

La misión GRACE ofrece prestaciones valiosas a la hora de abordar el cambio hídrico de los suelos en distintas regiones y países del planeta debido a que detecta y mide, mediante sensores, cómo el agua incide en la atracción gravitacional. Los cambios gravitacionales están asociados a cambios en las masas de agua terrestre a lo largo del tiempo. De esta manera, detecta el movimiento de grandes volúmenes de agua por encima (cuerpos y corrientes aéreas de agua) y debajo de la superficie terrestre (humedad superficial del suelo, acuíferos subterráneos). Una menor medida gravitacional (o anomalía negativa) captada por GRACE, puede ser

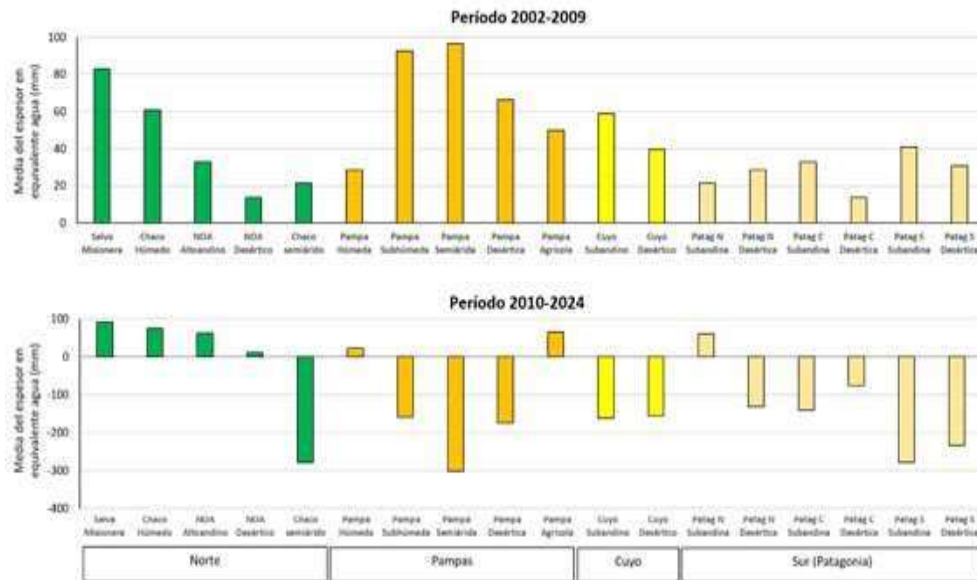
señal de una sequía persistente, un agotamiento de acuíferos por sobre-extracción, o una retracción y pérdida de glaciares. Por lo tanto, en lugar de hacer referencia a agua en el suelo, más preciso sería hablar de cambios en el “almacenamiento total de agua terrestre” o en la “reserva hídrica terrestre”.

En una primera aproximación con el fin de cuantificar cambios de las “reservas hídricas terrestres” del suelo en el mediano plazo en distintas ecorregiones de Argentina, se abordó un análisis en dos períodos con el fin de detectar cambios relevantes en el primer cuarto del siglo 21: entre 2002 y 2009, y entre 2010 y 2024. La reserva hídrica se expresa en valores medios (cm o mm) de Espesor de Equivalente Agua, la cual representa una estimación integrada, a escala multianual, del almacenamiento hídrico terrestre de cada ecorregión.

Los valores que se muestran en la **Figura 3** no son una cantidad exacta de agua almacenada, sino variaciones hídricas relativas a gran escala espacial. La declinación observada en 11 de las 18 ecorregiones sugiere una reducción significativa del almacenamiento regional de agua ocurrido durante el período 2010–2024, relación al período previo 2002-2009.

Los valores medios de almacenamiento hídrico en el período 2002-2009 parecen haber sido positivos (recarga) en la ecorregión de Selva Paranaense y Chaco Húmedo, en casi toda la región pampeana y Cuyo, y en menor medida en el Sur Patagónico. Pero esa condición no se mantuvo en el período subsiguiente. Los valores medios del período 2010-2024 muestran cambios importantes. Los datos muestran caídas significativas de almacenamiento hídrico medio en el Chaco Semiárido, en la región pampeana y en el extremo Sur Patagónico. En un sentido opuesto, en cuatro de las cinco ecorregiones del Norte argentino se detectaron ganancias del almacenamiento hídrico medio.

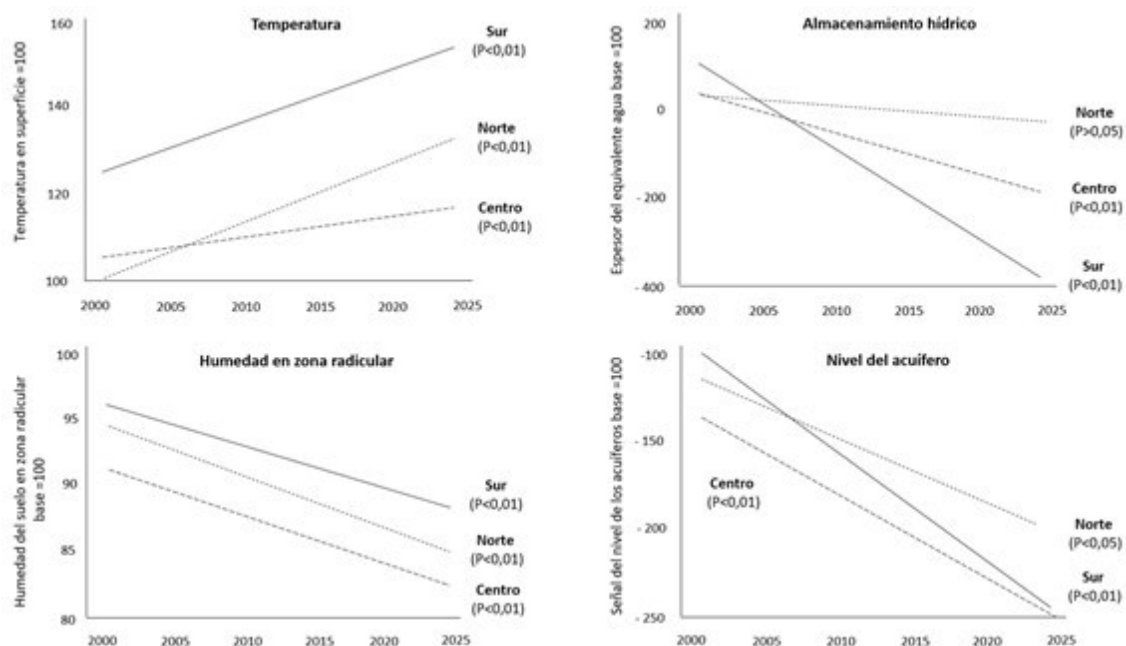
Al trasponer las escalas regionales, la escala más extensa que involucra a las regiones Norte, Centro y Sur resulta útil para evaluar algunos de los grandes patrones que dominan el escenario climático e hidrológico. En la Figura 4 se muestran las tendencias de cuatro variables de importancia crítica: la temperatura en superficie, el almacenamiento de agua en los suelos, la humedad en la zona radicular del suelo y la señal de nivel de los acuíferos subterráneos.



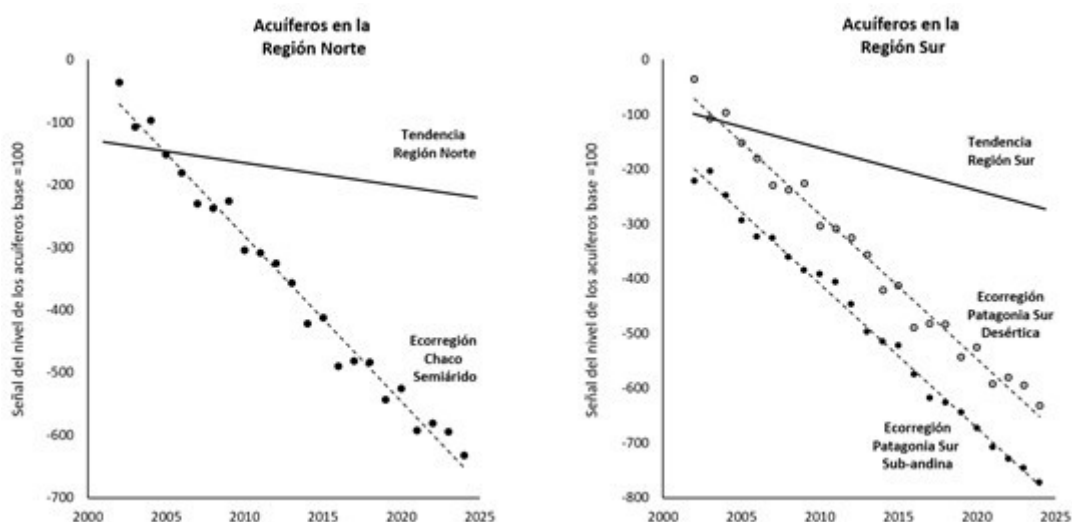
**Figura 3.** Valor medio del almacenamiento hídrico regional en equivalente agua (mm) en suelos de 18 ecorregiones de Argentina en dos períodos 2002-2009 y 2010-2024 según datos de la misión GRACE. En el segundo período se aprecia una notoria declinación del almacenamiento hídrico regional en los suelos de 11 de las 18 ecorregiones.

La temperatura en superficie es un indicador que parece afectar sensiblemente la funcionalidad de las variables hídricas en el período 2002-2024. Aumenta significativamente ( $P < 0,01$ ) en las tres regiones, aunque las pendientes positivas fueron más empinadas en las regiones Sur y Centro que en la región Norte. El almacenamiento hídrico en los suelos parece guardar una relación inversa a la de la temperatura. Se observa una caída notoria de los almacenajes en las tres regiones, pero mientras no resultó significativa ( $P > 0,05$ ) en el Norte, sí lo fue ( $P < 0,01$ ) en las regiones Centro y Sur, con una pendiente negativa mucho más notoria en el Sur. La humedad en zona radicular tuvo una declinación pareja con pendientes negativas muy significativas ( $P < 0,01$ ) de distinta magnitud en las tres regiones. El nivel de los acuíferos también declinó con tendencias negativas muy significativas ( $P < 0,01$ ) en las regiones Sur y Centro, y significativas ( $P < 0,05$ ) en la región Norte.

Al descender a un nivel en la escala espacial, los comportamientos hídricos de las ecorregiones pueden diferir drásticamente, ya que los promedios regionales tienden a moderar y enmascarar la variabilidad dentro de las ecorregiones. En el caso del nivel de los acuíferos aparecen tres casos extremos de ecorregiones que se apartan abruptamente de las medias regionales (**Figura 5**).



**Figura 4.** Patrones regionales de cambio en una variable climática y tres variables hídricas en el Norte.



**Figura 5.** Trasposición de escalas (de región a ecorregión) y desvío estadístico de algunas ecorregiones respecto a la tendencia media del nivel de los acuíferos en la región que las contiene. Se aprecian dos desvíos de gran magnitud: la ecorregión Chaco Semiárido en la región Norte, y las ecorregiones Patagonia Sur Subandina y Patagonia Sur Desértica en la región Sur.

La abrupta declinación del almacenamiento hídrico terrestre detectada por GRACE en el Chaco semiárido argentino quizás no pueda explicarse por tendencias climáticas actuales, sino por una reorganización hidrológica de la ecorregión. Es probable que los cambios extensivos y rápidos en el uso y cobertura de la tierra (como desmonte y cultivo) hayan disparado alteraciones mayores en los procesos de evapotranspiración, infiltración, escurrimiento y recarga de agua, y el posible agotamiento del legado hídrico acumulado durante períodos húmedos previos. Una

hipótesis factible puede focalizarse en cómo la ecorregión evapora, transpira, almacena, infiltra, escurre y redistribuye el agua.

Los dos grandes desvíos en el extremo austral de la Patagonia probablemente revelan una dinámica hidrológica distinta a la registrada por GRACE en la región Sur. La ecorregión Subandina depende fuertemente de la nieve acumulada, del aporte de los glaciares, del deshielo estacional, y de la recarga lenta de los acuíferos cordilleranos. Como mostraron varios autores, a raíz del calentamiento atmosférico, los Andes australes sufren desde la década de 1980 una retracción sostenida de glaciares, una menor persistencia de la nieve y los campos de hielo, lo cual conlleva un mayor escurrimiento y a una pérdida neta de almacenamiento hídrico continental. El gran desvío respecto a la tendencia media de la región Sur podría interpretarse como una amplificación de efectos típicos de los sistemas áridos. En ambientes de extrema escasez hídrica, un pequeño aumento de evapotranspiración puede causar una fuerte reducción del agua almacenada en el suelo.

En síntesis, en el Norte (Chaco Semiárido) la señal del desvío parece vincularse al desmonte y a la rápida expansión agropecuaria, mientras que en Patagonia Sur la señal estaría asociada a la pérdida de agua criosférica y al efecto de la aridez ecorregional. Se trata de dos mecanismos biofísicos distintos que conducen a un resultado parecido.

Asimismo, es menester destacar el caso de ecorregiones que habrían experimentado ganancias hídricas. En esas categorías aparecen la Selva Paranaense y el NOA Altoandino en la región Norte, la Pampa Agrícola en la región Centro, y Patagonia Norte Subandina. Por otro lado, aparecen como ecorregiones estabilizadas el Chaco Húmedo en la región Norte, y la Pampa Húmeda en la región Central.

La trasposición de escalas deja enseñanzas que sirven tanto al conocimiento científico como al diseño de estrategias y a la gestión hidrológica en los gobiernos nacional y provinciales. Desde una perspectiva científica, las propiedades hídricas emergentes a distinta escala espacial y temporal permiten avizorar tendencias de largo plazo e identificar las ecorregiones más y menos vulnerables a la variabilidad climática. Estos conocimientos son un insumo clave para la estrategia y la gestión de los gobiernos. Conocer a priori estos atributos sirven para tratar y prevenir conflictos transfronterizos que el calentamiento global agudiza en todo el mundo

## **1. Consideraciones preliminares**

El título de este estudio plantea dos preguntas inquietantes ¿Pierden nuestros suelos capacidad para almacenar agua? ¿Se agudiza este fenómeno en el siglo 21?

El agua es un recurso estratégico equivalente a la energía, los alimentos, la tecnología o la infraestructura. Tiene un valor geopolítico. Las reservas de agua son activos de alta importancia estratégica porque influyen sobre los acuerdos internacionales o interregionales de uso del recurso, ayuda a ordenar cuencas compartidas, y a prevenir conflictos de jurisdicción por el uso del agua. En algunas regiones del planeta es causa de migraciones que tiene origen en el clima y en los desbalances hídricos.

La producción agropecuaria depende de la humedad del suelo, de sus reservas subterráneas, y de la disponibilidad de agua para consumo animal o para riego. Esto es particularmente relevante en las extensas regiones semiáridas y áridas de Argentina, en las cuales pequeñas variaciones pueden producir grandes cambios productivos.

Otros sectores, como el residencial, el energético (extracción de hidrocarburos) y el industrial (refrigeración), tienen también una alta dependencia de la disponibilidad de agua subterránea del suelo.

Los cambios de masas de agua pueden convertirse en indicadores de alerta temprana necesarios para diseñar (i) políticas urbanas, como ampliar reservorios de agua, asegurar una provisión estable y ordenar la infraestructura hídrica, (ii) políticas rurales que permitan promover los sistemas de producción más adaptados al ambiente regional y la adopción de tecnologías amortiguadoras del riesgo climático y hídrico, (iii) políticas ambientales para conservar cuencas, proteger humedales y restaurar ecosistemas degradados, y (iv) intervenir en programas de ordenamiento territorial para detectar áreas vulnerables a las sequías, inundaciones y eventos climáticos extremos.

Ignorar los cambios de tendencia en las reservas hídricas puede disparar crisis momentáneas o permanentes. Los problemas asociados al agua pueden acumularse gradualmente y transformarse en crisis sociales, económicas y ambientales. Por ejemplo, una sobreexplotación de los acuíferos subterráneos puede causar una declinación en la oferta de agua, aumentar los costos de extracción y tratamiento, elevar el nivel de salinidad y, ocasionalmente, provocar hundimiento (subsistencia) de tierras por colapso de cavidades subterráneas. Igualmente, puede conducir a una infraestructura sobre- o sub-dimensionada, y elevar sus costos de diseño y mantenimiento.

Algunas preguntas de importancia crítica a escala de región son ¿La región acumula agua o agota sus reservas? ¿Los acuíferos se están recuperando o degradando? ¿Las sequías son episódicas o estructurales? ¿Existe riesgo latente de inundaciones? ¿Ocurren cambios asociados al clima? Una provincia o región que detecta cambios persistentes de tendencia puede actuar antes de llegar a una crisis.

Quienes evalúen tendencias, no deben quedar cautivos de una condición hídrica puntual o circunstancial, como una inundación o una sequía

estacional. En medio de estos episodios que pueden causar una conmoción temporal, existen patrones hidrológicos regionales de largo plazo que es necesario dilucidar y entender para tomar decisiones estratégicas apoyadas en el conocimiento científico.

Se prevé que los balances hídricos —la diferencia entre precipitación y evapotranspiración— disminuyan en muchas regiones del mundo debido a que el cambio climático ha modificado el ciclo del agua, la población mundial demanda más agua del subsuelo y la agricultura utiliza volúmenes crecientes de agua.

### **¿Declinan las reservas regionales de agua?**

#### **En busca de evidencias empíricas.**

Varios estudios basados en datos satelitales han mostrado una disminución significativa en el almacenamiento de agua en los suelos de Sudamérica durante el cuarto de siglo 2000-2025. Esta tendencia se debería a una combinación de sequías intensas, calentamiento atmosférico y sobre-explotación de acuíferos. Según Blöschl y Chaffe (2023) y Zhang et al. (2023) el Hemisferio Sur, en particular Sudamérica, domina a nivel global la pérdida de agua almacenada en suelos. En estudios satelitales, Rodell et al. (2024) y su equipo de la NASA han demostrado una abrupta declinación en los niveles globales de almacenamiento de agua en los suelos, y documentaron que el Este de la Amazonia y el acuífero Guaraní en Sudamérica experimentaron pérdidas significativas de agua tras las sequías posteriores al 2015. En 2024, en un análisis que abarcó miles de pozos a nivel global y que incluyó zonas de Sudamérica, Jasechko et al. confirmaron en la revista Nature que existe un agotamiento acelerado de los acuíferos subterráneos. Esto coincide con investigaciones satelitales previas de Khaki y Awange (2019) que mostraron una significativa tendencia hídrica a la baja en varias regiones de Sudamérica. Por su lado, al mapear el almacenamiento hídrico en suelos a través de la Misión espacial GRACE y datos físicos de precipitación, Pereira y Pacino (2012) detectaron significativas variaciones hídricas anuales y estacionales en la Cuenca del Plata.

Estas evidencias disparan inevitables interrogantes e hipótesis respecto a lo que ha ocurrido en suelos de la Argentina durante los primeros 25 años del siglo 21 ¿Sigue el almacenamiento de agua en los suelos de Argentina una tendencia similar a la que señalan los estudios arriba mencionados? ¿Hay un comportamiento hídrico homogéneo en todas las regiones del país? ¿Se trata de una fase declinante en un ciclo temporal mayor, o puede persistir en el futuro? Antes de arriesgar respuestas definitivas, es necesario tener un diagnóstico de lo ocurrido.

## **¿Por qué interesa evaluar cambios en el**

### **almacenaje hídrico de los suelos?**

El almacenamiento de agua en suelos es un componente central del sistema hidrológico-terrestre porque actúa como un buffer o amortiguador que regula el balance entre los flujos de entrada (precipitación) y los flujos de salida (evaporación/transpiración, escurrimiento, infiltración y recarga de acuíferos) de agua en los suelos.

Analizar estas tendencias en el mediano y largo plazo permite (i) Detectar cambios estructurales y funcionales asociados a factores impulsores o drivers (como lluvias, temperatura), a forzantes climáticos (como frecuencia e intensidad de las lluvias) y a forzantes antrópicos (como cambios de uso de la tierra, extracción de agua por bombeo); (ii) Identificar transiciones en el régimen hídrico (cambios hacia mayor abundancia o mayor déficit de agua en los suelos), y (iii) Ordenar estrategias que permitan administrar esos excesos y déficits con el fin de minimizar sus impactos negativos.

En el sector agropecuario, conocer cambios en la humedad superficial de los suelos es esencial debido a la dependencia de los cultivos y de los forrajes en ganadería extensiva. Evaluar las fases crecientes y decrecientes de humedad en la zona radicular permite elegir cultivos, ajustar fechas de siembra y manejar riesgos por sequía o excesos hídricos. En la hidrología agropecuaria moderna es vital evaluar a priori la resiliencia de distintos esquemas de producción frente a las anomalías hídricas de la zona o región. También resulta de extrema importancia conocer las trayectorias que experimentan los acuíferos subterráneos en áreas de regadío y uso intensivo de agua. En materia de estrategias hídricas, conocer las señales indirectas de los acuíferos permite evaluar fases de recarga y extracción, sea por uso urbano, o por utilización en procesos productivos del agro y la industria.

Desde el punto de vista científico, los estudios que exploran cambios en el agua superficial y sub-superficial permiten validar con información de campo los modelos de dinámica hidrológica en distintas regiones, provincias o localidades.

### **Sobre enfoques y métodos**

Se llega así a un punto crucial en el conocimiento de la hidrología de los suelos. Desde una perspectiva científica es necesario diferenciar los estudios puntuales o sitio-específicos, de aquellos estudios regionales que abordan escalas espaciales y temporales mayores.

Los enfoques y métodos de campo puntuales, in-situ (o sitio-específicos), son los que ha aplicado la investigación hidrológica tradicional. Aunque la

representatividad regional es limitada, son útiles porque generan datos (a menudo discontinuos) pero de alta resolución y precisión local. Generalmente son el producto de sensores (de reflectometría o gravimetría) colocados en el terreno que permiten monitorear en tiempo real variaciones de humedad en el suelo. Suelen integrar las redes meteorológicas y parcelas experimentales piezométricas en el seguimiento de los acuíferos.

Por otro lado, existen los enfoques y métodos regionales que exploran extensas áreas geográficas y largas series temporales. Lo hacen a través de plataformas satelitales, uso de algoritmos y modelos de superficie. Generan datos de alta consistencia espacial y temporal. Como ejemplos tenemos las prestaciones satelitales de la Misión GRACE y la cuantificación de variables en sistemas hidrológicos modelados como GLDAS, de la plataforma Giovanni de la NASA. Los datos de las variables hídricas que proveen estas herramientas permiten acceder a grandes promedios regionales de cada área, ecorregión o región evaluada (ver Anexo Metodológico en este mismo informe).

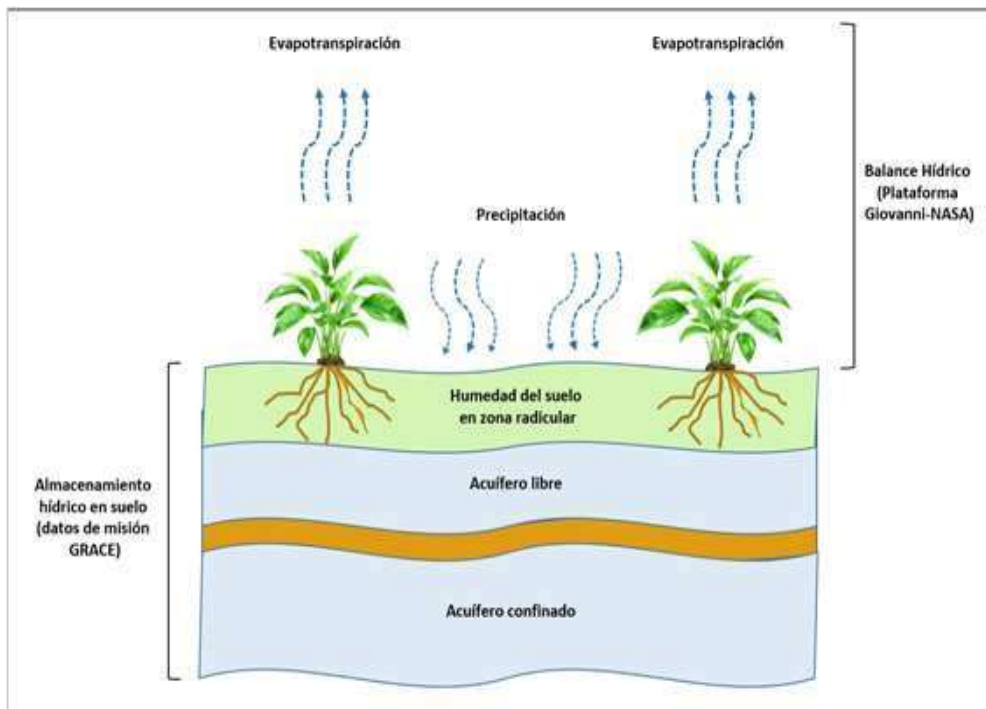
Las dos herramientas (la local y la regional) no se excluyen entre sí, sino que se complementan y ofrecen un cuadro completo de información a escalas diferentes. Dan respuesta a distintas preguntas, por ejemplo, el primero “¿qué ocurre en este sitio particular?; El segundo, “¿qué ocurre en la región?”. El enfoque espacial le da un contexto de región al sitio y permite validar su representatividad a escala regional. Lo concreto es que un producto satelital no puede reemplazar la validación local, ni los datos un sensor local pueden ser extrapolados a una región extensa. Mientras que una señal de disminución de la humedad del suelo aparece atenuada a nivel regional (los promedios aplanan los cambios), esos cambios suelen ser más abruptos a nivel local.

### **Objetivo y alcances de esta investigación**

Dada la existencia de datos hídricos locales aportados por redes y parcelas de experimentación, la propuesta de este estudio es complementar esa información con datos que reflejan lo que ocurre cuando traspone la escala desde el sitio puntual a la gran escala geográfica. Estos datos, menos conocidos, ayudan a interpretar lo local dentro de las grandes tendencias hídricas en extensas áreas territoriales. El período analizado en este trabajo se corresponde con la etapa crítica de retracción hídrica en el primer cuarto del siglo 21 que otros autores han señalado para Sudamérica.

Como se muestra en el esquema simplificado de la **Figura 1**, en el estudio se analizaron los promedios de almacenaje hídrico y sus tendencias según los datos de la plataforma Giovanni de la NASA y de la misión satelital GRACE. En paralelo se estudiaron las tendencias de temperatura,

precipitación, evapotranspiración, balance hídrico, humedad en zona radicular del suelo y las señales de cambio de los acuíferos subterráneos. Las tendencias y los patrones de cada región (Norte, Centro y Sur) fueron estimadas a través del período 2002-2024. En total, se conformó y analizó una base de  $\approx 118.000$  datos.

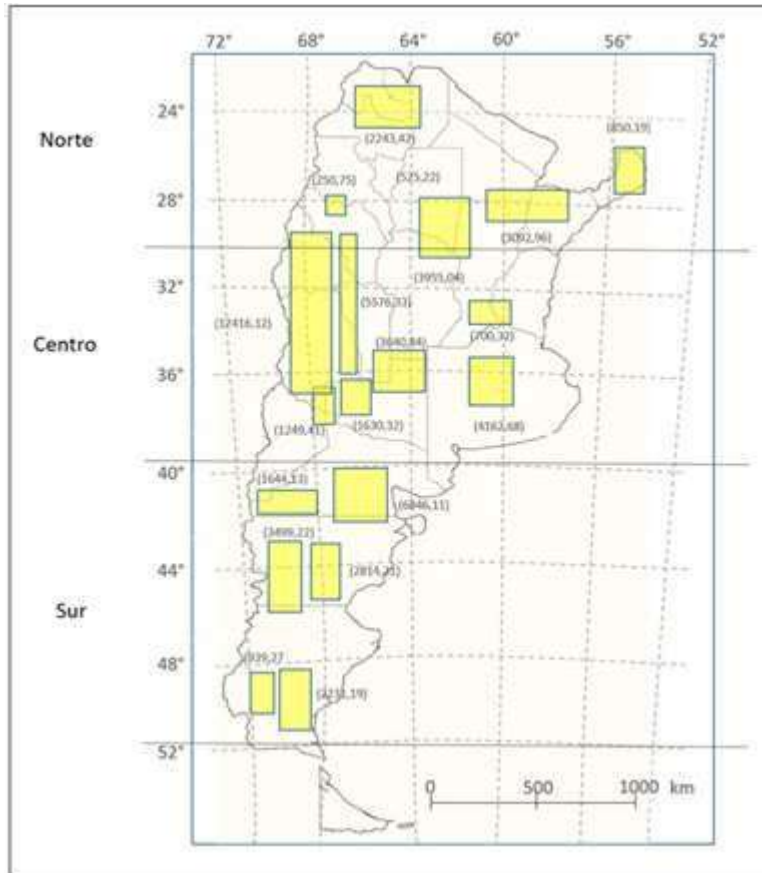


**Figura 1.** Esquema simplificado de los componentes climáticos y hídricos evaluados en este estudio

**Si bien los modelos GLDAS del proyecto Giovanni-NASA proveyeron valores hídricos absolutos en intervalos conocidos de tiempo, apoyado en datos de la misión GRACE una de las finalidades centrales de este estudio fue detectar tendencias de cambio relativo en el largo plazo.**

La investigación alcanzó a 18 ecorregiones localizadas a distintas latitudes y longitudes de Argentina (**Figura 2**) procurando representar regiones relevantes de Argentina. La ecorregión fue aquí definida como una unidad geográfica extensa, caracterizada por condiciones ambientales (clima, geomorfología, suelo, flora, y fauna) funcionalmente homogéneas, e independientes de los límites creados por el hombre. Las ecorregiones evaluadas suman alrededor de 58 millones de hectáreas, lo cual representa aproximadamente un 15 % del área territorial del país, excluyendo montañas y regiones con hielo permanente. Las ecorregiones se ordenaron en grandes espacios territoriales que se identificaron aquí como regiones Norte, Centro y Sur. O sea, el estudio abarcó dos escalas de análisis: la ecorregión y la gran región. En la región Norte se localizan las ecorregiones denominadas NEA Selva Paranaense, NEA Chaco Húmedo, NOA Alto Andina, NOA Desértica y Chaco Semiárido. La región Centro alberga las ecorregiones denominadas Pampa Húmeda, Pampa

Subhúmeda, Pampa Semiárida, Pampa Desértica, Pampa Agrícola, Cuyo Sub-andino y Cuyo Desértico. La región Sur contiene las regiones Sub-andinas y Desérticas de Patagonia Norte, Patagonia Centro y Patagonia Sur.



**Figura 2.** Localización geográfica aproximada de las ecorregiones analizadas en el Norte, Centro y Sur de Argentina. Entre paréntesis se indica el número de hectáreas analizadas (multiplicadas x 1000) en cada ecorregión. Los valores climáticos y hídricos analizados corresponden a una media de la superficie total de cada ecorregión. El análisis involucró un total 57.742.521 hectáreas.

## 2. El suelo como reserva hídrica

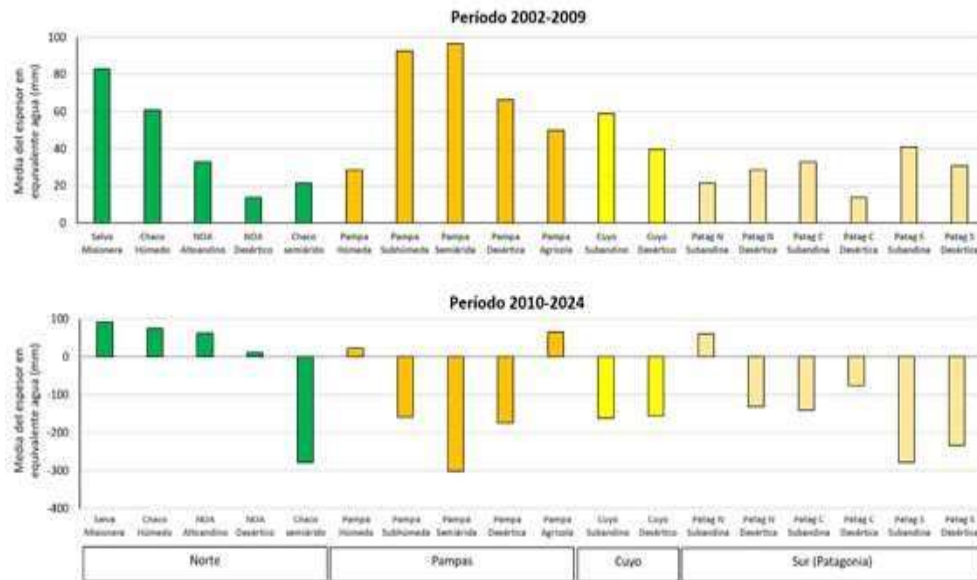
Como se ha señalado en el Anexo Metodológico, en la sección anterior y ha sido puntualizado por autores (Easus et al., 2015; Bolaños et al., 2021), la moderna tecnología satelital, los modelos de superficie y los algoritmos, y el análisis de grandes números ofrecen prestaciones valiosas a la hora de abordar el cambio hídrico de los suelos en distintas regiones y países del planeta. La misión GRACE, impulsada por la NASA y la Agencia Aeroespacial Alemana, se ha convertido en una herramienta valiosa y precisa para evaluar las reservas hídricas terrestres y sus cambios a través del tiempo.

La misión GRACE mide cómo el agua incide en la atracción gravitacional que detectan los sensores de los satélites. Los cambios gravitacionales

están asociados a cambios en las masas de agua terrestre a lo largo del tiempo. En la práctica GRACE mide el movimiento de grandes volúmenes de agua por encima y debajo de la superficie terrestre, y detecta cambios en la atracción gravitacional. Como la gravedad se asocia directamente a la masa, una mayor atracción gravitatoria indica, en una región dada, que existe una mayor masa de agua en la superficie terrestre o debajo de ella. Una menor medida gravitacional (o anomalía negativa) captada por GRACE, que se intensifica en el tiempo, puede ser la señal de una sequía persistente, un agotamiento de acuíferos por sobre-extracción, o una retracción y pérdida de glaciares.

La misión GRACE no mide directamente “stocks absolutos de agua en el suelo” en sentido estricto, sino los cambios que se registran en el almacenamiento total de agua terrestre a través de series temporales conocidas. Ese almacenamiento incluye un conglomerado de componentes hídricos resultante de la suma de agua en superficie (lagos, lagunas, ríos, arroyos), de humedad en el primer metro del suelo, de acuíferos o agua sub-superficial, de la nieve-hielo (donde exista) y del agua en biomasa vegetal (que no es significativa). Por lo tanto, en lugar de hacer referencia a agua en el suelo, más preciso sería mencionarlo como “almacenamiento total de agua terrestre” o “reserva hídrica terrestre”. En la mayor parte de las ecorregiones de Argentina donde no abundan los ríos, los cuerpos de agua y el hielo o la nieve, la señal GRACE provee datos precisos de tres componentes: humedad superficial en el suelo, almacenamiento subterráneo o sub-superficial, y cambios hacia un exceso o escasez.

En una primera aproximación, y con el fin de cuantificar cambios de las “reservas hídricas terrestres” del suelo en el mediano plazo en distintas ecorregiones de Argentina, se ha dividido el abordaje de esta sección en dos períodos: (i) el promedio de la reserva hídrica terrestre entre 2002 y 2009, el cual representa una condición media inicial de almacenamiento hídrico que es utilizado como valor de referencia en datos GRACE; y (ii) el promedio del período 2010–2024, que representa una condición media posterior destinado a completar los cambios registrados en el primer cuarto del siglo 21. La comparación entre ambos períodos permite inferir condiciones de ganancia o pérdida de almacenamiento de agua, persistencia de déficits o excesos, cambios estructurales del balance hídrico regional y la posible incidencia de efectos climáticos y/o antrópicos. GRACE es especialmente potente para detectar tendencias persistentes de largo plazo y no solo variabilidad interanual.



**Figura 3.** Valor medio del almacenamiento hídrico regional en equivalente agua (mm) en suelos de 18 ecorregiones de Argentina en dos períodos 2002-2009 y 2010-2024 según datos de la misión GRACE. En el segundo período se aprecia una notoria declinación del almacenamiento hídrico regional en los suelos de 11 de las 18 ecorregiones.

Basado en los datos de GRACE del período 2002-2024, la Figura 3 representa el Valor

Medio de Almacenamiento Hídrico Regional. Vale la pena recordar que los datos de GRACE utilizados en este estudio no miden una reserva estática y absoluta de agua, sino una masa hídrica integrada cuya señal se promedia en períodos conocidos. En otros términos, los valores medios de Espesor de Equivalente Agua derivados de GRACE representan una estimación integrada, a escala multianual, del

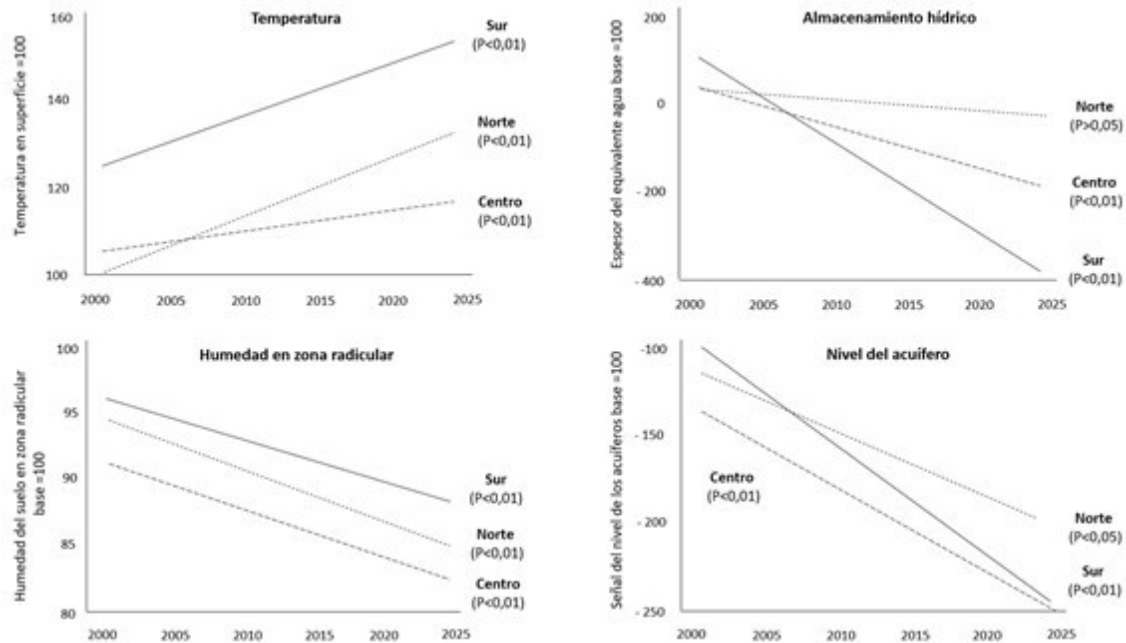
almacenamiento hídrico terrestre de cada ecorregión. Los valores que se muestran en la Figura 3 no son una cantidad exacta de agua almacenada, sino estimaciones de cambio relativo a gran escala espacial. La declinación observada en 11 de las 18 ecorregiones sugiere una reducción significativa del almacenamiento regional de agua durante el período 2010–2024.

El hecho de trabajar con períodos multianuales fortalece la robustez de la interpretación porque reduce el “ruido” interanual asociado a eventos ENSO, sequías aisladas o pulsos húmedos temporarios. Por el contrario, permite reflejar las tendencias estructurales del almacenamiento hídrico. El resultado que muestra la declinación en 11 de 18 ecorregiones es relevante porque apunta a un fenómeno regional persistente, y no simplemente episódico.

Los valores medios de almacenamiento hídrico en el período 2002-2009 parecen haber sido positivos (recarga) en la ecorregión de Selva Paranaense y Chaco Húmedo, en casi toda la región pampeana y Cuyo, y en

menor medida en el Sur Patagónico. Pero esa condición no se mantuvo en el período subsiguiente. Los valores medios del período 2010-2024 muestran cambios importantes. Los datos muestran caídas significativas de almacenamiento hídrico medio en el Chaco Semiárido, en la región pampeana y en el extremo Sur Patagónico. En un sentido opuesto, en cuatro de las cinco ecorregiones del Norte argentino se detectaron ganancias del almacenamiento hídrico medio.

Desde un punto de vista agronómico, estos valores medios representan una reserva hídrica integrada, pero no se trata técnicamente de agua edáfica aprovechable por los cultivos o las pasturas. Varios de los componentes hídricos no tienen un impacto directo sobre el sector agropecuario. La señal de GRACE está directamente influida por el balance hídrico resultante de la precipitación y evapotranspiración, la temperatura superficial del suelo, el escurrimiento superficial, la extracción o recarga de los acuíferos, la frecuencia de sequías o excesos hídricos y los usos de la tierra. El balance hídrico explica los mecanismos involucrados, y GRACE mide los impactos.



**Figura 4.** Patrones regionales de cambio en una variable climática y tres variables hídricas en el Norte.

Desde una perspectiva exclusivamente agronómica, más que los datos de GRACE tienen relevancia los datos de humedad del suelo en zona radicular (generalmente, el primer metro de suelo). Estos datos son provistos por la plataforma Giovanni de la NASA a través del modelo de superficie GLDAS (ver Anexo Metodológico). Se puede inferir que esos valores (Figura 4) sí tienen un impacto sobre la productividad de los cultivos, las pasturas y los pastizales. Los mayores niveles medio de humedad edáfica (expresados en mm/m<sup>2</sup>) entre 2002 y 2024 se han detectado, respectivamente, en las ecorregiones de Selva Paranaense y Patagonia Norte Subandina. Las restantes ecorregiones no mostraron grandes variaciones entre ellas.

Sorprende, no obstante, que las ecorregiones patagónicas hayan mostrado, como promedio del período 2002-2024, mayores promedios de humedad en zona radicular que la propia región pampeana.

Más allá de los almacenamientos de agua en el suelo, interesa evaluar las tasas de cambios y las tendencias de largo plazo que han ocurrido en las 18 ecorregiones evaluadas a través del primer cuarto del siglo 21.

### **3. El almacenamiento hídrico regional.**

#### **Tendencias en el primer cuarto del siglo 21**

Evaluar las tasas de cambio de las masas verticales e integradas de agua de una región a través del tiempo permite observar el funcionamiento hídrico real de un territorio o región, y detectar si los suelos mantienen una humedad estable, acumulan o pierden agua (Falkenmark, 2003). Puede parecer trivial, pero este asunto excede a una simple interpretación pluviométrica; tiene un considerable valor económico, social, ambiental y geoestratégico.

Analizar únicamente la evolución de las lluvias suele resultar engañoso. Una región puede recibir precipitaciones normales o superiores a lo normal, y aun así perder reservas hídricas edáficas debido a otros factores, como el aumento de la temperatura y la evapotranspiración. Lo propio puede ocurrir con la explotación de las reservas subsuperficiales (acuíferos) debido a cambios en el uso de la tierra. En términos hidrológicos, las masas hídricas funcionan como la “cuenta bancaria” de una región: la precipitación representa un ingreso, la evapotranspiración y las salidas de agua son egresos, y el almacenamiento en el suelo es el capital hídrico disponible (Keys et al., 2019).

Como se ha señalado anteriormente, la misión satelital GRACE se desarrolló precisamente bajo esta lógica: medir tasas de cambio relativo en el almacenamiento total de agua terrestre y detectar tendencias que antes era casi imposible medir en forma directa. Dicho de manera sencilla, los datos de la misión GRACE y GRACE-FO permiten detectar y cuantificar, desde el espacio, cambios relevantes en las masas hídricas terrestres.

En materia de utilidad y aprovechamiento, los ecólogos y los ambientalistas le dan una vuelta de tuerca a la problemática hídrica y marcan una diferencia entre agua verde y agua azul (Falkenmark y Rockström, 2006). Mientras que el agua verde es el agua de lluvia almacenada en el suelo como humedad radicular y consumida por las plantas, el agua azul incluye la contribución de ríos, lagos, lagunas y agua subterránea que se extrae y fluye en estado líquido.

El agua verde representa una forma de humedad productiva retenida en el suelo y consumida por las plantas. Es vital para los cultivos de secano, la

base forrajera de la ganadería, la silvicultura y los propios ecosistemas naturales. Facilita la fotosíntesis y la transpiración de las plantas. El agua azul, en cambio, es en la práctica un recurso gestionable por los humanos, que se bombea, almacena en represas o cuencos, y se transporta de un sitio a otro mediante acueductos o tuberías. Generalmente su destino es el consumo humano y residencial, el ganadero, el industrial y el riego convencional (Falkenmark, 2004).

¿Qué muestra la misión GRACE en cuanto a las tendencias de almacenamiento hídrico en suelos de Argentina en el primer cuarto del siglo 21? Aunque los datos no permiten discriminar si se trata de agua en superficie, humedad superficial en suelo o agua subsuperficial, el sistema sí permite detectar grandes patrones temporales de tendencia de almacenamiento hídrico en cada una de las 18 ecorregiones argentinas analizadas (Cuadro 1). En solo 4 de las 18 ecorregiones se detecta una ganancia neta de masa hídrica: en la Selva Paranaense (provincia de Misiones), en la Pampa Húmeda (Centro de la provincia de Buenos Aires), en la Pampa Agrícola (conocida como zona núcleo) que comparten fracciones de las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos), y en la ecorregión Norte Subandina (provincias de Río Negro y Neuquén). Con tendencias negativas muy significativas, las 14 ecorregiones restantes muestran una pérdida neta de reservas hídricas entre 2002 y 2024.

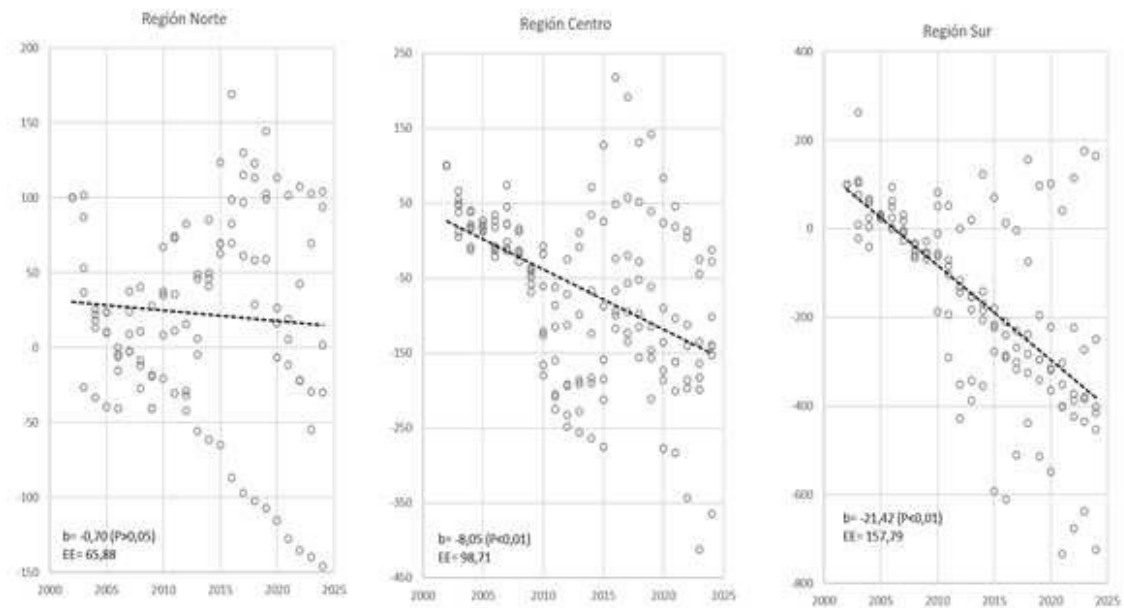
Región	Sub-región	Ecorregión	Provincias argentinas	Valor y significancia estadística de la pendiente b (tendencia 2002-2024)	
				Espesor de equiv-agua (GRACE, base año 2002)	
Norte	Norte NEA-	NEA Selva Paranaense	Misiones	+ 0,339 **	
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	- 0,242 **	
	Norte NOA	NOA Altoandino	Salta y Jujuy	- 0,502 **	
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	- 0,108 **	
Centro	Norte Centro	Chaco Central Semiárido	N de Cordona y S del Estero	- 2,827 **	
	Pampas	Pampa Húmeda	Buenos Aires	+ 0,137 *	
		Pampa Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	- 1,459 **	
		Pampa Semiárida	La Pampa	- 1,940 **	
		Pampa Desértica	La Pampa	- 1,170 **	
		Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y Entre Ríos	+ 0,247 *	
	Cuyo	Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	- 1,256 **	
		Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	- 1,061 **	
	Sur	Patagonia	Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	+ 0,450 **
			Patagonia Norte Desértica	Río Negro	- 0,843 **
Patagonia Centro Subandina			Chubut	- 1,372 **	
Patagonia Centro Desértica			Chubut	- 0,688 **	
Patagonia Sur Subandina			Santa Cruz	- 2,718 **	
		Patagonia Sur Desértica	Santa Cruz	- 2,216 **	

\* no significativa (P<0,05) \* Significativa (P<0,05) \*\* Muy significativa (P<0,01)

**Cuadro 1.** Signo, valor y significancia estadística de las tendencias (pendiente b) y Almacenamiento Hídrico promedio según datos de la misión GRACE en 18 ecosistemas relevantes de Argentina entre 2002 y 2024.

Al referir estos datos a patrones de tendencia (calculados sobre base=100) se intenta comparar en igualdad de condiciones dotaciones hídricas muy distintas entre regiones diferentes. Respecto al patrón de almacenamiento hídrico (Espesor de Equivalente Agua) en las regiones Norte, Centro y Sur, las tres experimentaron pérdida de masas totales de agua entre 2002 y

2024 (**Figura 5**). Con excepción de la región Norte que muestra una pendiente negativa no significativa ( $P>0,05$ ), la declinación hídrica fue mucho más severa en las regiones Centro y Sur (sobre todo en esta última) con pendientes negativas muy significativas ( $P<0,01$ ). Los errores estándar de las tres regiones muestran un valor inverso al de la pendiente  $b$  (mayor en el Sur y menor en el Norte). Este panorama obliga a imaginar estrategias específicas para cada región y ecorregión involucrada, de manera que se privilegie el uso del agua según prioridades bien definidas, sea para provisión de agua para consumo humano y animal, para uso minero o industrial, para riego de cultivos, o para conservar activos ecológicos y ambientales.



**Figura 5.** Patrón regional de Almacenamiento Hídrico (base=100) según datos del Espesor del Equivalente Agua provistos por la misión GRACE en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Las pendientes ( $b$ ) negativas de las regiones Centro y Sur fueron muy significativas ( $P<0,01$ ). También fue negativa, pero no significativa ( $P>0,05$ ) la tendencia de la región Norte. EE=error estándar de la regresión.

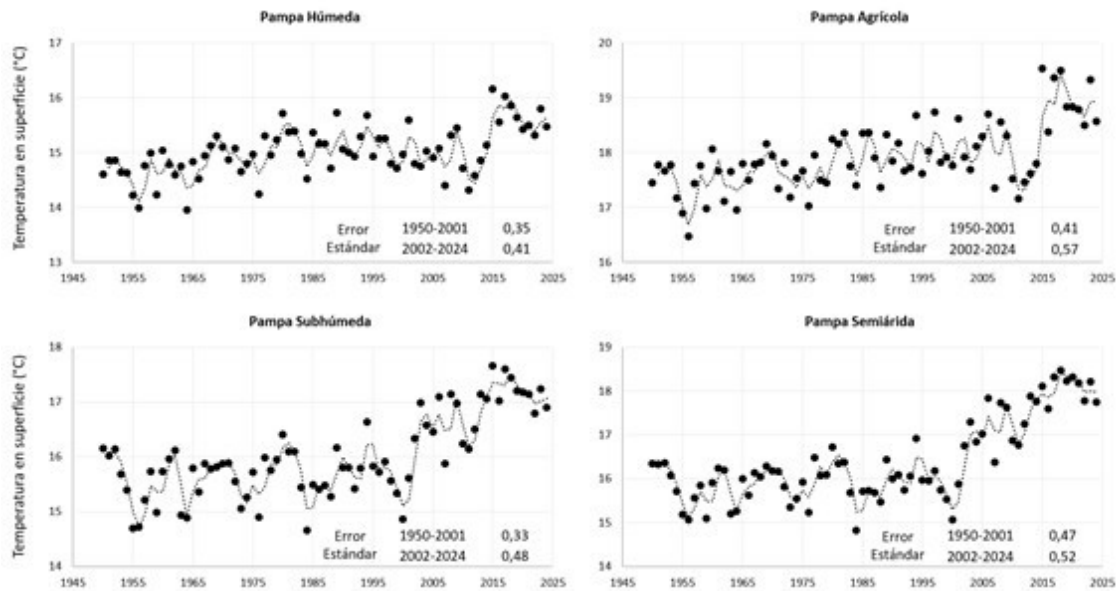
#### 4. ¿Modula el clima la hidrología regional?

La hidrología de los suelos en una región está modulada por una compleja interacción de factores físicos, climáticos, biológicos y antrópicos que determinan la dinámica del agua en los suelos ((Vereecken et al., 2022). La temperatura y las lluvias son dos determinantes climáticos de reconocido impacto en la hidrología regional porque modulan el ciclo y la disponibilidad de agua, y marcan la intensidad de fenómenos extremos como inundaciones y sequías. Actúan en conjunto para controlar los movimientos verticales (evaporación, infiltración) y horizontales (escurrimiento) del agua, determinando si una región es húmeda, árida, o propensa a sufrir inundaciones o a sequías.

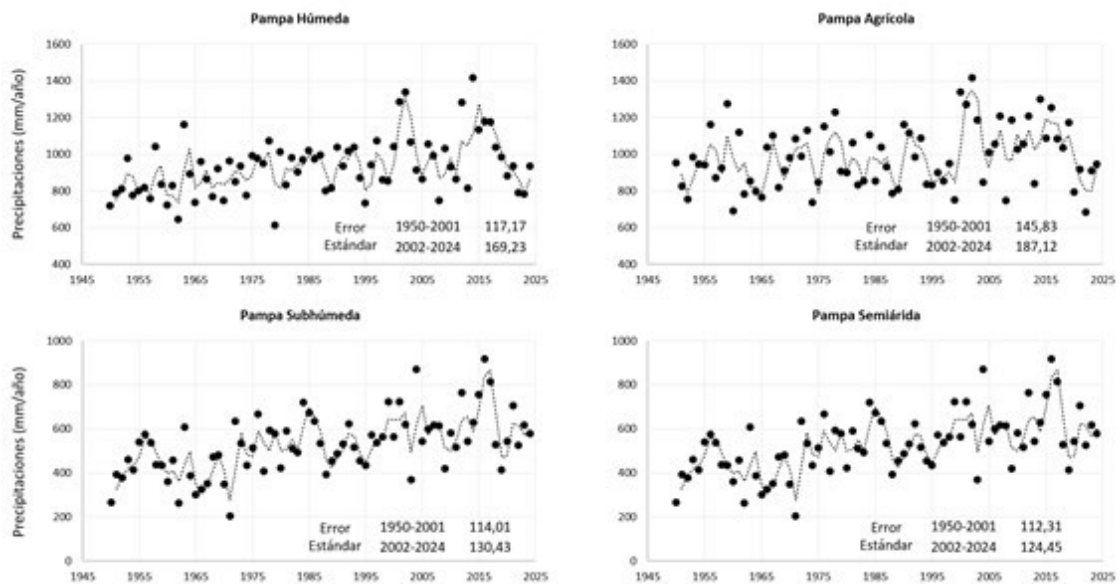
La temperatura superficial es un potente regulador de la evapotranspiración (NOAA, <https://www.noaa.gov.translate.google.com/education/resourcecollections/freshwater/water-cycle>). A mayores temperaturas, mayor es la evaporación desde suelos y cuerpos de agua, y mayor la transpiración de las plantas, lo cual reduce la humedad superficial y afecta el caudal de los ríos y arroyos. Las altas temperaturas alteran la física atmosférica y regulan la capacidad de la atmósfera para retener humedad y generar tormentas de distinta intensidad. Por su parte, las lluvias definen la entrada de agua al sistema. La precipitación es la fuente primaria que alimenta los cuerpos y cursos de agua, transfiere humedad superficial a los suelos y recarga acuíferos. Cuando las lluvias son intensas y concentradas suelen superar la capacidad de infiltración del suelo, provocando inundaciones o escurrimientos acelerados. Las precipitaciones sólidas como nieve o granizo actúan como almacenamiento temporal del agua y modulan caudales e infiltración en los suelos.

La interacción entre la precipitación y la temperatura define el déficit o exceso de agua edáfica. Un aumento de temperatura sin aumento de lluvias genera sequías severas. En zonas llanas, los movimientos verticales de evaporación/infiltración prevalecen sobre los horizontales (escurrimiento), tornando a esas regiones sensibles a problemas de anegamiento e inundación. El calentamiento atmosférico global es un factor que intensifica el ciclo hidrológico, dispara olas de calor y define las tasas de evaporación y transpiración. Asimismo, es causal de patrones de precipitación más erráticos que afectan directamente la disponibilidad de agua en los suelos (Naciones Unidas, <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climatechange>).

El análisis de las temperaturas y las lluvias en las distintas ecorregiones identificadas en este estudio (**Figuras 6 y 7**) fue un primer paso para reconstruir la trayectoria de ambos factores a través de una serie histórica de 75 años, entre 1950 y 2024. Como fuente de datos se utilizó la plataforma GLDAS-Giovanni, la cual provee datos que representan el promedio de una región espacialmente amplia de muchos km<sup>2</sup>. Es necesario señalar que la plataforma GLDAS tuvo un cambio metodológico que determinó que el modelo de superficie GLDAS 2.0 que explora el período 1948-2014 fuera reemplazado por una versión más avanzada (GLDAS 2.1) que registra datos del período que se inicia en el año 2000 y prosigue hasta la actualidad (ver Anexo Metodológico). El reemplazo se justificó en el hecho de que GLDAS 2.1 presenta valores validados más cercanos a la realidad.



**Figura 6.** Temperatura media anual en superficie en cuatro regiones de la pradera pampeana y comparación de los errores estándar entre los períodos 1950-1989 y 1990-2024



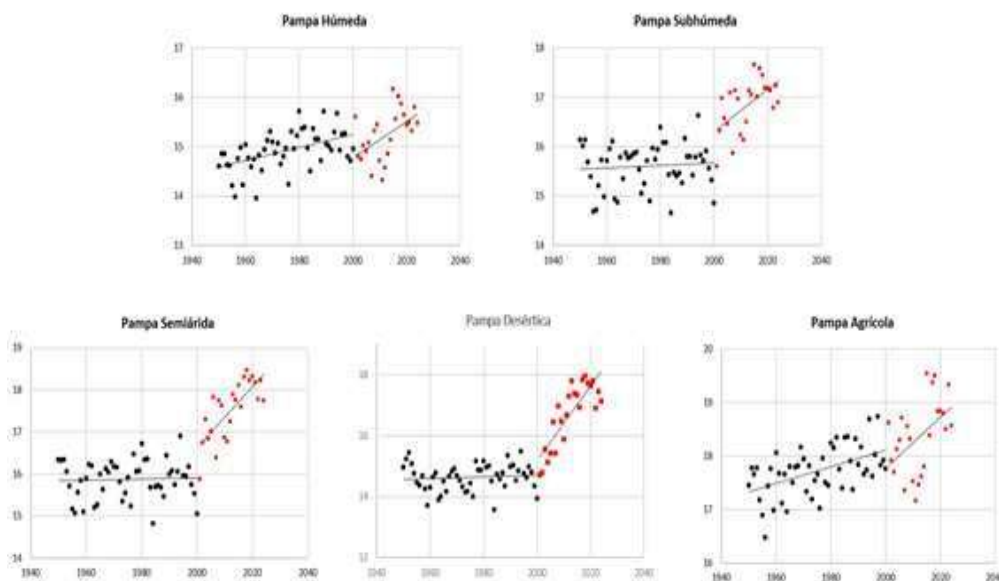
**Figura 7.** Precipitaciones en cuatro regiones de la pradera pampeana y comparación de los errores estándar entre los períodos 1950-2001 y 2002-2024.

Es importante prestar atención a las estimaciones del Error Estándar tanto en temperaturas como en precipitaciones. Se puede apreciar que ocurrió un aumento significativo del Error Estándar en el último período (2002-2024) respecto al anterior (1950-2001). Este cambio se puede interpretar de maneras diferentes: por un lado, es dable presumir que tanto las temperaturas como las lluvias se tornaron más extremas, por ejemplo, tormentas más intensas y olas de calor más frecuentes. Estos fenómenos se podrían atribuir al efecto del calentamiento global. Por otro lado, el aumento de valores del Error Estándar podría atribuirse a un cambio

metodológico como resultado de sustituir el modelo GLDAS 2.0 por el modelo más avanzado GLDAS 2.1.

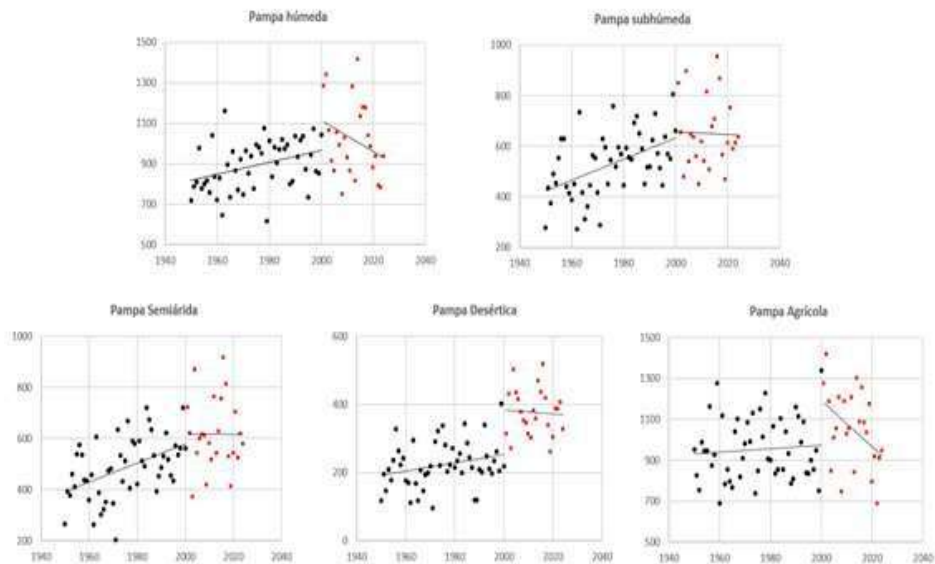
Esta sustitución creó alguna dificultad a la hora de empalmar los datos de ambos períodos. No siempre ese empalme es sencillo ni permite dar una continuidad estadística suave a los valores de ambas versiones. Esto se puede apreciar en los datos de temperatura y precipitación para cuatro ecorregiones de la pradera pampeana en las **Figuras 8 y 9**, tomadas como ejemplo en este caso para ilustrar los resultados de empalmar ambas versiones. En ambas figuras se muestran los cambios de tendencia ocurridos a partir del inicio del siglo 21. El mismo ejercicio se repitió con las restantes ecorregiones estudiadas.

Más allá de la imperfección de los empalmes entre GLDAS 2.0 y GLDAS 2.1, se aprecia que en el período 2002-2024 ocurrió una inversión significativa de las tendencias térmica y hídrica. Las temperaturas de la pradera pampeana se mantuvieron relativamente estables durante el tramo 1950-2000, pero a partir de esa fecha, y hasta la actualidad, las temperaturas superficiales del aire aumentaron linealmente de manera persistente. Las pendientes de aumento fueron estadísticamente muy significativas en las cuatro regiones evaluadas (**Figura 8**).



**Figura 8.** Cambios de tendencia de la temperatura media del aire (°C) en superficie en la región pampeana argentina entre 1950 y 2024 según la plataforma GLDAS-Giovanni. El análisis muestra que hubo un cambio de tendencia a partir del inicio del siglo 21.

Con menor claridad se definieron las tendencias de las lluvias entre 2002 y 2024 (**Figura 9**). Las precipitaciones tendieron a ser negativas en todos los casos. Por lo tanto, en la región pampeana se definió un patrón declinante de lluvias, aunque en términos estadísticos ese patrón resultó muy significativo ( $P < 0,01$ ) en las ecorregiones correspondientes a la Pampa Húmeda y la Pampa Agrícola, y no significativo ( $P > 0,05$ ) en las ecorregiones Subhúmeda y Semiárida.



**Figura 9.** Cambios de tendencia de las lluvias (mm/año) en la región pampeana argentina entre 1950 y 2024. El análisis muestra que el cambio de la tendencia habría ocurrido partir del inicio del siglo 21.

En el **Cuadro 2** se presentan datos sobre las pendientes del período 2002-2024 de temperaturas y lluvias para todas las ecorregiones analizadas. Respecto a la temperatura superficial, con excepción de la ecorregión Patagonia Norte Sub-Andina en cual se detectó una tendencia negativa no significativa, en el resto de las ecorregiones las tendencias fueron positivas y muy significativas. En otros términos, las pendientes de temperaturas experimentaron aumentos positivos y muy significativos en todas las ecorregiones analizadas de Argentina. Respecto a las lluvias, en 14 de las 18 ecorregiones analizadas tendieron a declinar, pero con pendientes poco significativas. Esa declinación fue muy significativa solamente en 6 de aquellas 14 ecorregiones.

Estos resultados sugieren que las temperaturas superficiales del aire tuvieron un rol gravitante, generalizado y muy significativo en 17 de las 18 ecorregiones. Seguramente fue la temperatura el factor que más influyó sobre la dinámica hídrica de las ecorregiones evaluadas, ya que es un acelerador de la evapotranspiración desde el suelo y las plantas. Si bien las precipitaciones han incidido más en algunas ecorregiones que en otras, no puede por ahora afirmarse que hayan gravitado de manera significativa sobre el ciclo hidrológico de las ecorregiones.

Región	Sub-región	Ecosistema	Provincias argentinas	Valor y significancia estadística de la pendiente b (tendencia 2002-2024)	
				Temperatura media anual (°C)	Precipitaciones (mm/ año)
Norte	Norte NEA-NOA-Centro	NEA Selva Paranaense	Misiones	+ 0,030 **	- 1,313 *
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	+ 0,047 **	- 4,227 *
		NOA Albandino	Salta y Jujuy	+ 0,386 **	- 0,634 *
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	+ 0,042 *	+ 1,401 *
Centro	Pampas	Chaco Central Semihúmedo	N de Cordona y S del Estero	+ 0,239 **	+ 0,263 *
		Pampa Oriental Húmeda	Buenos Aires	+ 0,462 **	- 5,518 *
		Pampa Central Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	+ 0,034 **	+ 1,655 **
		Pampa Semihúmeda	La Pampa	+ 0,063 **	+ 1,071 *
	Cuyo	Pampa Desértica	La Pampa	+ 0,115 **	- 3,429 *
		Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y Entre Ríos	+ 0,057 **	- 10,181 **
		Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	+ 0,090 **	- 0,774 *
		Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	+ 0,091 **	- 1,806 *
Sur	Patagonia	Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	- 0,004 *	- 14,427 **
		Patagonia Norte Desértica	Río Negro	+ 0,134 **	- 1,860 *
		Patagonia Centro Subandina	Chubut	+ 0,086 **	- 3,150 **
		Patagonia Centro Desértica	Chubut	+ 0,1025 **	- 2,310 *
		Patagonia Sur Subandina	Santa Cruz	+ 0,062 **	- 9,433 **
		Patagonia Sur Desértica	Santa Cruz	+ 0,062 **	- 2,602 **

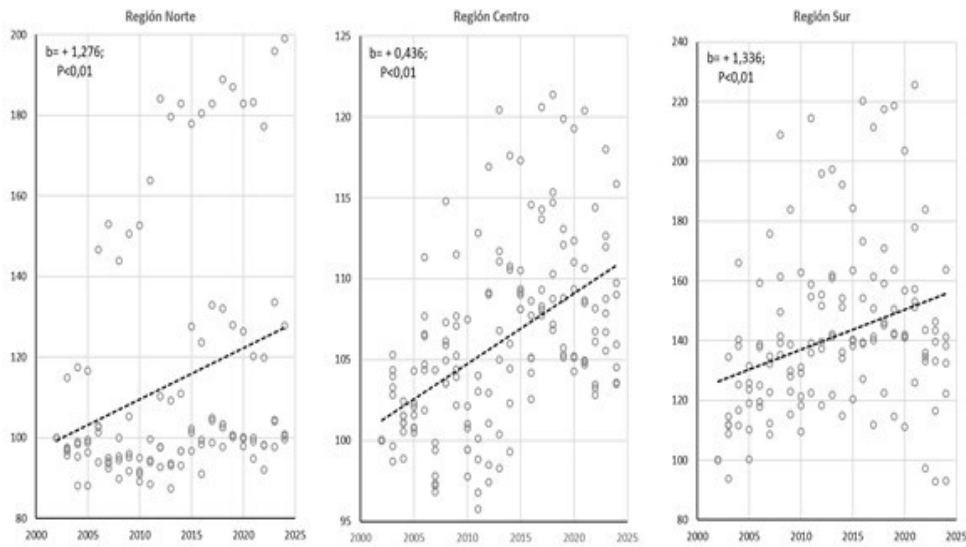
\* no significativa (P>0,05) \* Significativa (P<0,05) \*\* Muy significativa (P<0,01)

**Cuadro 2.** Signo, valor y significancia estadística de las tendencias (pendiente b) de temperatura y lluvias en 18 ecosistemas analizados de Argentina entre 2002 y 2024. En 17 de las 18 ecorregiones analizadas se registra un aumento muy significativo de las temperaturas, y en 14 de las 18 ecorregiones analizadas las precipitaciones tendieron a declinar.

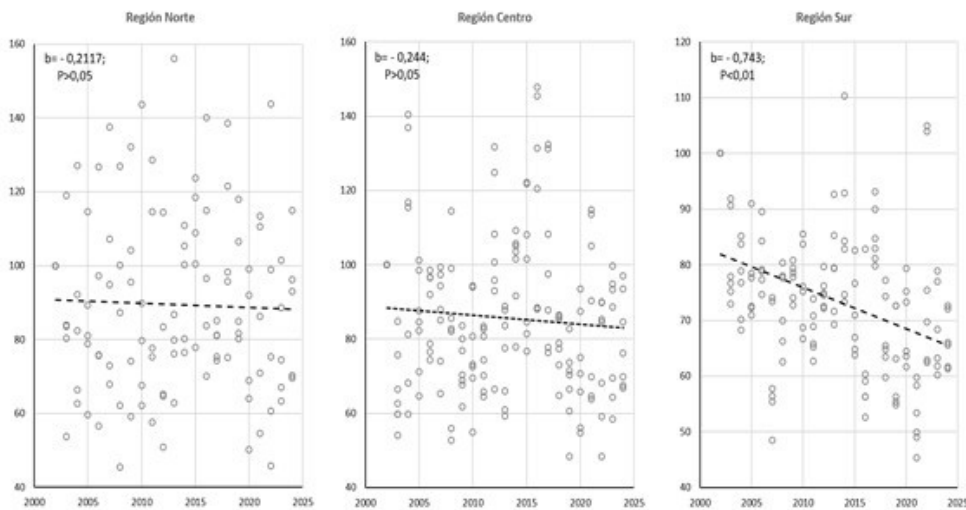
Con el fin de detectar y comparar patrones dominantes de cambio de las temperaturas y lluvias en las macro-regiones estudiadas (Norte, Centro y Sur) de Argentina, todos los valores hallados en cada ecorregión fueron convertidos tomando una base 100 para el valor inicial del año 2002. Esta conversión permite detectar una pendiente general que refleje la tendencia de cada región (Norte, Centro y Sur) independientemente de sus valores absolutos.

Como muestra la **Figura 10**, las temperaturas aumentaron con tendencia positiva (valor de la pendiente b) muy significativa en las tres grandes regiones. Más allá del valor de las pendientes calculadas, es importante señalar que en el período 2002-2024, las temperaturas aumentaron proporcionalmente más (30%) en la región Sur que en las otras dos (Norte 27 % y Centro 9 %).

Respecto a las precipitaciones (**Figura 11**), en las tres regiones mostraron una tendencia declinante. Pero solamente en la región Sur la pendiente negativa fue muy significativa ( $P<0,01$ ), resultando no significativa en las regiones Norte y Centro. Como patrón general, la temperatura del aire en superficie parece haber jugado un rol más relevante que la precipitación en el comportamiento hídrico de Argentina.



**Figura 10.** Patrón regional de temperatura superficial (base=100) en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Las tres pendientes que reflejan aumentos de temperatura en superficie fueron muy significativas ( $P < 0,01$ ).



**Figura 11.** Patrón pluviométrico regional (base=100) en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Las tendencias muestran una pluviometría declinante, pero solamente la pendiente de la Región Sur fue muy significativas a nivel de  $P < 0,01$ . En las otras dos regiones, las pendientes no fueron significativas.

Como detalle adicional, es menester mencionar los resultados obtenidos de un análisis del error estándar de los dos períodos analizados en cada una de las tres grandes regiones (**Cuadro 3**).

Región	Sub-región	Ecosistema	Provincias argentinas	Error Estándar de la Temperatura media		Error Estándar de las Precipitaciones anuales	
				1950-2001	2002-2024	1950-2001	2002-2024
Norte	NEA	NEA Selva Paranaense	Misiones	0,486	0,755	295,25	307,11
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	0,424	0,680	222,54	224,80
	NOA	NOA Altoandino	Salta y Jujuy	0,342	0,571	64,24	71,48
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	0,384	1,435	62,99	81,11
	Centro	Chaco Semiárido	N de Córdoba y S del Estero	0,457	0,500	87,45	99,57
Centro	Pampas	Pampa Húmeda	Buenos Aires	0,350	0,415	117,17	169,23
		Pampa Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	0,330	0,481	114,01	130,43
		Pampa Semiárida	La Pampa	0,466	0,523	112,31	124,45
		Pampa Desértica	La Pampa	0,445	0,613	65,17	77,14
		Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y E. Ríos	0,406	0,567	145,83	187,12
	Cuyo	Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	0,424	0,545	71,34	87,45
		Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	0,415	0,573	65,50	54,84
Sur	Patagonia	Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	0,415	0,610	198,23	206,75
		Patagonia Norte Desértica	Río Negro	0,446	0,890	32,30	104,62
		Patagonia Centro Subandina	Chubut	0,434	0,850	70,91	85,93
		Patagonia Centro Desértica	Chubut	0,414	0,759	31,68	109,08
		Patagonia Sur Subandina	Santa Cruz	0,428	1,041	88,59	146,02
		Patagonia Sur Desértico	Santa Cruz	0,434	0,707	37,44	30,96

**Cuadro 3.** Comparación de los errores estándar de precipitaciones y temperatura entre 1950-2001 y 2002-2024. Los resultados muestran significativo aumento de los errores estándar en el período 1990-2024 respecto al período anterior (1950-2001), lo cual reflejaría una tendencia a multiplicar eventos extremos en el primer cuarto del siglo 21.

Como el error estándar mide la variabilidad de los datos alrededor de cada pendiente, un valor más alto puede indicar una tendencia hacia un aumento de los valores extremos (outliers) de los datos. En todas las ecorregiones del Cuadro 3 se aprecia que el error estándar del período 2002-2024 fue más alto que el del período anterior (1950-2001), lo cual reflejaría que en el período 2002-2024 aumentó la tendencia a producir más eventos extremos, tanto en las temperaturas como en precipitaciones, que en el período anterior (1950-2001). Como se mencionó anteriormente, este fenómeno puede ser compatible con la teoría climática y la evidencia empírica dominante que indica que el creciente calentamiento atmosférico global va acompañado a una mayor ocurrencia de eventos climáticos extremos.

## 5. Las “finanzas” del agua: Balance Hídrico (BH) regional.

Como concepto clave de la ciencia hidrológica, en su forma más simple el Balance Hídrico (BH) expresa la relación entre las entradas, salidas y cambios en el almacenamiento de agua en un territorio o fracción territorial (cuena, país, ecorregión, provincia, etc.). Un BH integra señales ecológicas, climáticas, hidrológicas y antrópicas (Rodríguez-Iturbe, 2019) y refleja el “estado de cuentas” del sistema. Permite saber si una región gana agua, la pierde, o mantiene un equilibrio hídrico.

El BH es un indicador sintético del funcionamiento hidrológico de una región. Un BH negativo a través del tiempo permite predecir el riesgo de sequías persistentes, procesos de desertificación y sobreexplotación de acuíferos. Por el contrario, un sostenido BH positivo permite inferir riesgos de inundación y anegamiento. En esencia, el BH es un indicador que puede anticipar la vulnerabilidad territorial a eventos hídricos extremos (Davie y Wyndham Quinn, 2019).

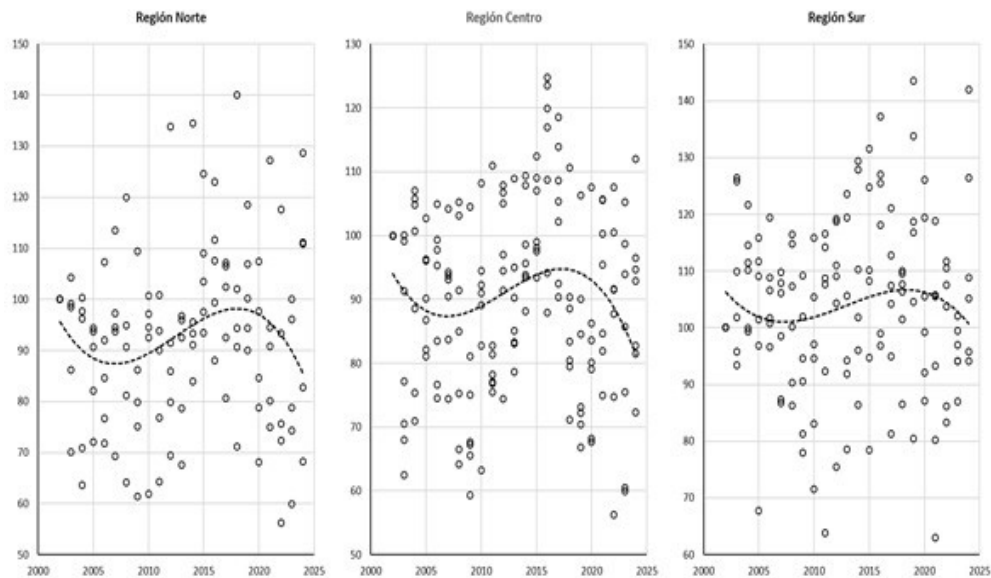
En regiones extensas y heterogéneas -como ocurre en Argentina- estudiar el BH de las ecorregiones pone en evidencia los efectos de interacciones distintas entre el clima, suelo, vegetación, relieve, nivel freático e intervención antrópica (Rodrigues Capitulo et al. 2022). La lógica hídrica de la Pampa Húmeda es muy diferente a la de la Patagonia árida o de la ecorregión Alto Andina.

Desde un punto de vista físico, el BH se apoya en el principio de conservación de masa: el agua que entra menos el agua que sale equivale al cambio en el almacenamiento interno del sistema (Thorntwaite y Mather, 1955). En un área dada, el BH es la diferencia entre precipitación, evapotranspiración, los movimientos horizontales por escurrimiento superficial (ingresos y salidas), y los desplazamientos verticales del agua por infiltración (Dingman, 1988).

La Evapotranspiración (ET) es la principal salida de agua en sentido vertical (hacia la atmósfera), ya que incluye la evaporación directa desde el suelo y los cuerpos de agua, más la transpiración de la vegetación (Allen et al., 1988). La ET es afectada por la temperatura, radiación, cobertura vegetal y usos de la tierra, efectos que pueden ser potenciados por el cambio climático. Por otro lado, calcular los escurrimientos superficiales no es nada sencillo, porque están influidos por factores tales como la intensidad de las lluvias, la pendiente, la cobertura vegetal, las impermeabilizaciones urbanas y rurales y la propia textura de los suelos. La infiltración es el otro componente hídrico vertical que está afectado por la precipitación, la pendiente, el grado de saturación hídrica del suelo, la estructura y composición del mismo y la cobertura de vegetación (Chow et al., 1988).

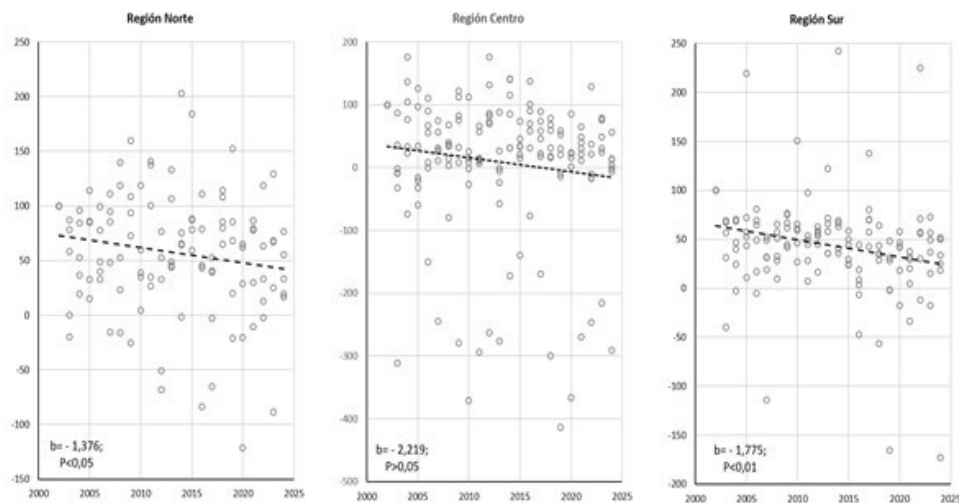
Debido a las complejidades y dificultades prácticas para estimar un BH completo que integre todas las variables en juego, en este estudio el análisis se redujo únicamente a dos factores de alta incidencia: la precipitación y la evapotranspiración.

Las tendencias de precipitación sobre base 100 fueron desplegadas en la **Figura 11** de la sección anterior. En el caso de la ET, el comportamiento de las tendencias fue similar en las tres regiones (**Figura 12**), pero las oscilaciones muestran formato sugestivamente errático. La ET irrumpió con valores altos al comenzar el siglo 21, luego declinó abruptamente entre 2005 y 2010, y ascendió de nuevo alcanzando un pico entre 2015 y 2020. Luego se insinúa una nueva fase descendente hasta el 2024.



**Figura 12.** Patrón regional de Evapotranspiración (base=100) en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. El modelo cúbico de regresión fue el que mostró el mejor ajuste. Las tres regiones muestran un patrón oscilante y similar de variación. Fueron muy significativos ( $P<0,01$ ) en las regiones Norte y Centro y no significativo en la región Sur ( $P>0,05$ ).

No está claro cómo explicar esta performance azarosa, pero el resultado del BH por diferencia entre precipitaciones y evapotranspiración ha sido declinante entre 2002 y 2024 (**Figura 13**), en medio de una gran dispersión de datos, especialmente en la región Centro. El patrón regional hacia una tendencia negativa fue muy significativo ( $P<0,01$ ) en la Región Sur, significativo ( $P<0,05$ ) en la región Norte y no significativo en la Región Centro ( $P>0,05$ ).



**Figura 13.** Patrón regional (base=100) del Balance Hídrico en las regiones Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Todas las pendientes fueron negativas, pero solamente fue muy significativa ( $P<0,01$ ) en la región Sur. Los datos originales se expresaron en mm/m<sup>2</sup>.

Si bien el patrón regional del BH fue declinante en todos los casos, un análisis detallado de cada una de las ecorregiones (**Cuadro 4**) muestra una trayectoria algo errática probablemente por influencia directa de la ET.

Región	Sub-región	Ecosistema	Provincias argentinas	Valor y significancia estadística de la pendiente b (tendencia 2002-2024)
				Balance Hídrico (mm/m2)
Norte	Norte NEA-NOA-Centro	NEA Selva Paranaense	Misiones	-5,117 *
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	-3,604 **
		NOA Altoandino	Salta y Jujuy	-4,096 **
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	+0,145 *
		Chaco Central Semiárido	N de Córdoba y S del Estero	+2,247 **
Centro	Pampas	Pampa Oriental Húmeda	Buenos Aires	-2,224 *
		Pampa Central Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	+2,284 *
		Pampa Semiárida	La Pampa	-0,098 **
		Pampa Desértica	La Pampa	-1,793 **
	Cuyo	Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y Entre Ríos	+2,628 *
		Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	-1,900 **
Sur	Patagonia	Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	-2,735 **
		Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	-15,312 **
		Patagonia Norte Desértica	Río Negro	-2,501 **
		Patagonia Centro Subandina	Chubut	-9,179 **
		Patagonia Centro Desértica	Chubut	-15,312 **
		Patagonia Sur Subandina	Santa Cruz	-9,858 **
Patagonia Sur Desértica	Santa Cruz	-1,860 **		

\* no significativa ( $P < 0,05$ )    \* Significativa ( $P < 0,05$ )    \*\* Muy significativa ( $P < 0,01$ )

**Cuadro 4.** Signo, valor y significancia estadística de las tendencias (pendiente b) de Balance Hídrico en las 18 ecorregiones analizadas de Argentina entre 2002 y 2024.

Los resultados muestran 4 signos positivos y 14 signos negativos en las tendencias del período 2002-2024. Solamente la región Sur presenta todas las tendencias con signo negativo muy significativo ( $P < 0,01$ ).

## 6. La reserva hídrica del agro

La humedad del suelo en la zona radicular (Root Zone Soil Moisture, RZSM) es uno de los indicadores más valorados (Rodell et al., 2004) en los sistemas NASA Giovanni y Global Land Data Assimilation System (GLDAS). Representa un “reservorio hídrico funcional” disponible para la vegetación y para numerosos procesos hidrológicos y climáticos de una región (ver Anexo Metodológico al final de este informe). Es un indicador clave porque no cuantifica solamente el agua en el suelo, sino que también sintetiza la interacción entre precipitación, infiltración, evapotranspiración, drenaje, extracción por raíces y almacenamiento sub-superficial.

La zona radicular comprende el volumen de suelo explorado por las raíces activas de la vegetación. En las plataformas GLDAS (Teng et al., 2014), esta zona suele abarcar aproximadamente el primer metro o más del perfil edáfico, dependiendo del modelo de superficie terrestre utilizado. A diferencia de la humedad superficial (0–10 cm), muy sensible a lluvias recientes y a la evaporación inmediata, la humedad en zona radicular refleja, entre otras cosas, la memoria hídrica del sistema, la disponibilidad efectiva de agua para las plantas, el BH entre entradas y salidas de agua, la capacidad del ecosistema para amortiguar sequías y el acoplamiento de

variables hidrológicas entre la superficie terrestre y la atmósfera (Luo et al., 2023). Como es una variable con mayor estabilidad temporal que otras, tiene mayor significancia ecológica, ambiental e hidrológica.

Desde una perspectiva agronómica, la productividad primaria, el crecimiento vegetal y el rendimiento agrícola dependen mucho más del agua almacenada en la zona radicular que de la humedad superficial (NASA, 2015). Una lluvia breve puede humedecer circunstancialmente los primeros centímetros del suelo, pero si el perfil radicular permanece seco, los cultivos quedarán bajo estrés hídrico. Diversos trabajos muestran que la humedad en zona radicular tiene una fuerte relación con la productividad vegetal, la rentabilidad de los cultivos y la propia seguridad alimentaria de una región.

La humedad del suelo tiene una influencia directa sobre la funcionalidad del proceso hidrológico. Cuando el perfil del suelo está húmedo aumenta el escurrimiento, disminuye la capacidad de infiltración y propicia el anegamiento si hay un exceso de lluvia. Cuando está seco favorece la infiltración, disminuye el escurrimiento y aumenta la demanda evaporativa. Asimismo, La humedad radicular regula la ET y ésta controla el flujo de calor latente, el flujo de calor sensible y la temperatura superficial del suelo. Asociadas al calentamiento atmosférico y al cambio climático, estudios recientes muestran tendencias globales decrecientes de humedad radicular.

Mientras la precipitación es un flujo instantáneo, la humedad del perfil funciona como una memoria hidrológica acumulativa (Koster et al., 2004) que actúa como buffer. Por eso suele correlacionarse mejor con la estabilidad de la producción, con la persistencia de sequías y/o anegamientos y la capacidad adaptativa de sistemas agropecuarios.

La humedad en zona radicular del suelo es una de las mejores aproximaciones disponibles del estado hídrico regional a través de series temporales prolongadas (Ojha et al., 2024). No puede ser captada fácilmente desde un satélite porque la mayoría de sensores de microondas detectan sólo los primeros centímetros del suelo. Pero los productos como GLDAS de Giovanni-NASA “reconstruyen” sus trayectorias mediante la combinación de observaciones satelitales, datos meteorológicos, propiedades del suelo y modelos físicos de superficie terrestre. Como se expuso en el Anexo Metodológico, la humedad radicular del suelo es útil para reconstruir el perfil hídrico sub-superficial de una región mediante aplicación de algoritmos que estiman señales de cambio en los acuíferos subterráneos.

En el **Cuadro 5** se aprecia que, con una sola excepción que ocurre en la ecorregión del Norte desértico de Argentina (pendiente no significativa), en el resto de las ecorregiones las tendencias de humedad del suelo en zona radicular fueron de signo negativo y la mayor parte de ellas muy significativas ( $P < 0,01$ ). Inequívocamente, estos datos indican que las

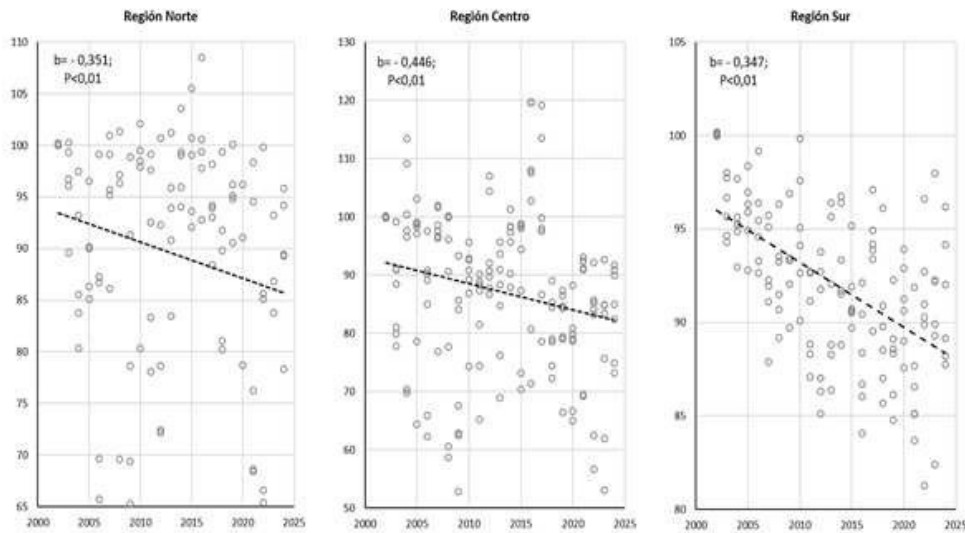
tendencias de humedad en zona radicular del suelo tienden a declinar en 17 de las 18 ecorregiones analizadas. Y es una señal indicativa de la declinación de las reservas hídricas en gran parte del territorio argentino.

Región	Sub-región	Ecosistema	Provincias argentinas	Valor y significancia estadística de la pendiente b (tendencia 2002-2024)
				Humedad en Zona Radicular (mm/m <sup>2</sup> )
Norte	Norte NEA-NOA-Centro	NEA Selva Paranaense	Misiones	-3,359 **
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	-2,374 **
		NOA Altoandino	Salta y Jujuy	-0,134 **
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	+0,042 *
		Chaco Central Semiárido	N de Cordona y S del Estero	-1,863 **
Centro	Pampas	Pampa Oriental Húmeda	Buenos Aires	-1,322 **
		Pampa Central Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	-0,783 **
		Pampa Semiárida	La Pampa	-0,653 **
		Pampa Desértica	La Pampa	-0,486 *
	Cuyo	Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y Entre Ríos	-2,927 **
		Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	-0,976 **
Sur	Patagonia	Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	-0,991 **
		Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	-1,140 **
		Patagonia Norte Desértica	Río Negro	-0,957 **
		Patagonia Centro Subandina	Chubut	-0,969 *
		Patagonia Centro Desértica	Chubut	-0,858 *
		Patagonia Sur Subandina	Santa Cruz	-0,890 **
Patagonia Sur Desértica	Santa Cruz	-0,969 **		

\* no significativa (P<0,05) \* Significativa (P<0,05) \*\* Muy significativa (P<0,01)

**Cuadro 5.** Signo, valor y significancia estadística de las tendencias (pendiente b) de la Humedad del Suelo en Zona Radicular en las 18 ecorregiones analizadas de Argentina entre 2002 y 2024.

Como muestra la **Figura 14**, esas tendencias quedan corroboradas por los patrones regionales del Norte, Centro y Sur del país. Las tres pendientes muestran la declinación: fueron negativas y muy significativas ( $P < 0,01$ ). La pendiente negativa más empinada se detecta en la región Sur. Desde una perspectiva agronómica, es posible inferir que esas tendencias tienen un impacto físico negativo sobre los rendimientos de los cultivos, pasturas y pastizales. Afortunadamente, la tecnología abre espacios para neutralizar o amortiguar esos efectos.



**Figura 14.** Patrón regional (base=100) de la Humedad del Suelo en Zona Radicular en las regiones Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Las tres pendientes fueron muy significativas al nivel de  $P < 0,01$ . Los datos originales se expresaron en  $\text{mm}/\text{m}^2$ .

## 7. Señales que envían los acuíferos subterráneos

En esta sección no se evalúan los cambios absolutos en la profundidad de los acuíferos sino en las señales relativas que indican una tendencia, sea negativa (pérdida de masa hídrica), neutra (sin cambio) o positiva (ganancia de masa hídrica).

El agua subterránea dejó de ser considerado un recurso “invisible e inagotable” como en sentido genérico se ha tendido a creer. Hoy se lo concibe como un componente crítico de resiliencia hídrica y climática. Eso cambia la lógica para abordar su gestión. Un acuífero bien conservado es concebido como una reserva estratégica (Green, 2011) de una región o un país. La tendencia internacional apunta hacia el monitoreo piezométrico continuo (uso de sensores en pozos) y al monitoreo satelital (detección gravimétrica desde el espacio), al uso de indicadores de sustentabilidad hídrica y al diseño de políticas adaptativas basadas en la evidencia científica. Monitorear los acuíferos es una forma de “tomarle el pulso” al sistema de agua subterránea. Un descenso persistente rara vez es un fenómeno aislado. Suele revelar tensiones estructurales de largo plazo entre el clima, la demanda antrópica y uso que los humanos hacen del suelo (Kløve et al., 2011).

Desde una perspectiva científica, un acuífero es parte de un sistema hidrológico integrado que conecta y sirve de puente entre el clima y la demanda de agua, y que actúa como un amortiguador en tiempos de sequía y variabilidad climática (Kløve et al., 2014).

Racionalizar el uso de los acuíferos subterráneos significa administrar la extracción de agua de manera compatible con la capacidad natural de

recarga del sistema hídrico y con las necesidades presentes y futuras de la sociedad y los ecosistemas (Alley y Leake, 2004). No implica necesariamente “dejar de usar” el acuífero, sino usarlo dentro de límites que eviten su degradación física, química, ecológica y económica.

Cuando una región ingresa en un período de balance hídrico negativo entra en tensión con su sistema hídrico. Si la extracción supera sistemáticamente a la recarga, el acuífero se retrae, quizás muy lentamente al principio, pero a un nivel difícil de revertir cuando la retracción se ha acumulado (Famiglietti, 2014). Algunas consecuencias visibles de ese deterioro son el descenso progresivo del acuífero y del nivel freático, un mayor costo de bombeo y uso de energía, un deterioro progresivo de la calidad del agua por acumulación de flúor, arsénico y sales, y por la intrusión de aguas salinas en los huecos emergentes del subsuelo. Además, suele ser causa frecuente de conflictos entre sectores por el uso del agua.

¿Cómo aborda la ciencia la problemática de los acuíferos subterráneos? La lógica científica consiste en detectar tendencias tempranas antes de que el deterioro sea evidente e irreversible (Karandish et al., 2025). En hidrología se llega tarde cuando el problema se hace visible y afecta directamente a la sociedad, como ha ocurrido, por ejemplo, en Ciudad del Cabo en Sudáfrica y en otras regiones del mundo. Es elemental reconocer que el sistema hídrico responde a leyes físicas y no a decisiones políticas o percepciones sociales. Las herramientas con que cuenta la ciencia para estudiar tendencias son las redes piezométricas, los modelos que simulan balance hídrico, los satélites que miden cambios gravitacionales como GRACE (Alley y Konikow, 2015) y las bases que integran datos como los modelos GLDAS de la plataforma Giovanni de la NASA (Eamus et al., 2015). La ciencia no debe decidir en función de intereses políticos o preferencias sociales circunstanciales. Simplemente debe evaluar y establecer los límites biofísicos dentro de los cuales la política y la sociedad deberían manejarse. No se puede gestionar racionalmente aquello que se desconoce, y que sencillamente se desconoce porque no se mide ni evalúa.

¿Cuándo aparecen tensiones por el aprovechamiento de un acuífero? Cuando los habitantes creen que el agua subterránea es inagotable y se puede usar sin control, cuando los regantes de cultivos piensan solamente en aprovecharla en la próxima estación, o cuando los políticos piensan en satisfacer a los ciudadanos en tiempos electorales, en los cuales “no puede faltar agua”. Pero la ciencia no piensa en el corto plazo sino en décadas, y el acuífero tiene una dinámica aún más larga en el tiempo. A menudo la sociedad percibe abundancia porque hay agua en superficie, los pozos todavía producen, y no se aprecia un deterioro visible porque ocurre en el subsuelo. La sustentabilidad de un acuífero no se define en términos de cuánto recurso está hoy disponible, sino en función de la relación entre la velocidad de extracción y la velocidad de recarga (Alley et al., 1999).

La racionalidad científica indica que hay que medir antes de decidir, definir umbrales de extracción, proteger zonas de recarga, priorizar usos

estratégicos, integrar aguas superficiales y subterráneas, mejorar eficiencias de uso, evaluar escenarios climáticos futuros y ajustar la política hídrica a la evidencia científica (Thomann et al. 2022). En definitiva, racionalizar el aprovechamiento de los acuíferos subterráneos es una cuestión de seguridad hídrica. Las regiones que lo entienden así suelen adaptarse antes que las consecuencias sean visibles (Taylor et al., 2013). Las que reaccionan tarde normalmente enfrentan opciones más limitadas y costos económicos más altos.

Como se detalla en el Anexo Metodológico, el interrogante clave plantea si es posible aislar la tendencia de un acuífero dentro de una serie de datos provistos por GRACE. Sin duda, la señal de los acuíferos se encuentra subsumida dentro de lo que se denomina agua total. Desde el punto de vista físico, la señal gravitatoria integra toda la columna vertical de masas de agua que varían a través del tiempo, desde la superficie hasta varias decenas de metros de profundidad.

La señal relevante de cambio en GRACE es la de los acuíferos libres, los que están en contacto con la atmósfera y son los más accesibles al uso humano. El método que se aplica para detectar señales de cambio en los acuíferos subterráneos surge de una combinación de datos de GRACE y de GLDAS-Giovanni. El enfoque estándar para aislar la señal de agua subterránea consiste en restar los componentes de agua superficial (humedad del suelo, nieve, agua superficial) del almacenamiento total de agua aportado por GRACE. Cuando se dan las condiciones para restar estos componentes, GRACE captura bien las tendencias de los acuíferos subterráneos en respuesta a los ciclos húmedos y secos, las recargas y extracciones regionales y los eventos extremos como las sequías.

Por dificultades para estimar el aporte de ríos, arroyos, lagos, lagunas y otros aportes superficiales de agua que varían mucho en el tiempo, en este estudio se procedió a restar directamente las dos reservas más estables de agua: la humedad superficial del suelo en zona radicular de la masa de agua subsuperficial. En el Cuadro 6 se resumen los datos de la señal de los acuíferos (pendientes negativas y positivas) en las 18 ecorregiones analizadas. Las señales indican ganancias de agua muy significativas ( $P < 0,01$ ) en 4 ecorregiones bien definidas (Selva Paranaense, NOA Altoandino, Pampa Agrícola y Patagonia Norte Subandina). En cambio, las señales indican depresiones muy significativas ( $P < 0,01$ ) en los acuíferos de las 14 ecorregiones restantes, pero muy especialmente en la Patagonia Sur Subandina y Desértica.

				Valor y significancia estadística de la pendiente (b); tendencia 2002-2024
Región	Sub-región	Ecosistema	Provincias argentinas	Tendencia nivel de los acuíferos
Norte	Norte NEA-NOA-Centro	NEA Selva Paranaense	Misiones	+ 6,758 **
		NEA Chaco Húmedo	Chaco y Corrientes	-0,045 *
		NOA Altoandino	Salta y Jujuy	+ 5,259 **
		NOA Desértico	Catamarca y La Rioja	- 1,076 **
		Chaco Semiárido	N de Córdoba y S del Estero	- 26,405 **
Centro	Pampas	Pampa Húmeda	Buenos Aires	- 0,049 *
		Pampa Subhúmeda	Buenos Aires y La Pampa	- 13,810 **
		Pampa Semiárida	La Pampa	- 18,759 **
		Pampa Desértica	La Pampa	- 10,715 **
		Pampa Agrícola	Buenos Aires, Córdoba y Entre Ríos	+ 13,665 **
	Cuyo	Cuyo Subandino	Mendoza y S Juan	- 9,629 **
		Cuyo Desértico	Mendoza y S Juan	- 11,566 **
Sur	Patagonia	Patagonia Norte subandina	Río Negro y Neuquén	+ 5,644 **
		Patagonia Norte Desértica	Río Negro	- 7,518 **
		Patagonia Centro Subandina	Chubut	- 12,754 **
		Patagonia Centro Desértica	Chubut	- 6,025 **
		Patagonia Sur Subandina	Santa Cruz	- 26,290 **
		Patagonia Sur Desértico	Santa Cruz	- 26,405 **

\* no significativa (P>0,05)    \* Significativa (P<0,05)    \*\* Muy significativa (P<0,01)

**Cuadro 6.** Tendencias (pendiente b) 2002-2024 de la señal que refleja el nivel de los Acuíferos Subsuperficiales en 18 ecorregiones relevantes de Argentina. En la última columna se muestran el signo, valor y significancia estadística de las tendencias.

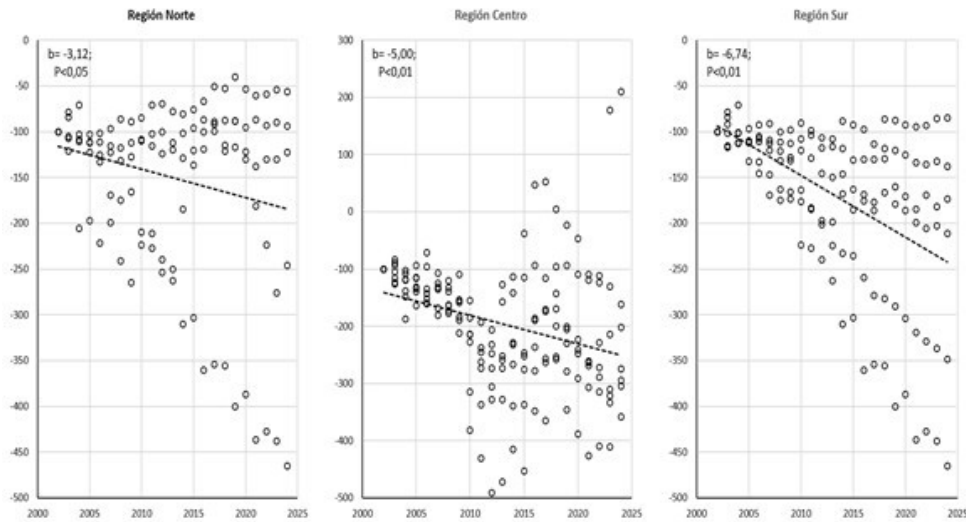
Con el fin de validar el grado de certeza que pueden tener estos datos, un Análisis de Incertidumbre de los cálculos efectuados parece ser el camino apropiado. En el **Cuadro 7** se presenta una estimación del nivel de incertidumbre de los datos generados en los 18 ecosistemas analizados a través de la Misión GRACE y GRACE-FO (EWT, Espesor del Equivalente Agua) y a través del modelo hidrológico GLDAS (RZSM, Humedad del Suelo en Zona Radicular) de la plataforma Giovanni-NASA. Los niveles de incertidumbre fueron calificados en categorías Alto, Medio y Bajo a través de la relación entre el promedio de la diferencia EWT-RZSM y el error estándar de cada serie de datos. La región Central del país (Pampas + Cuyo) es la que presenta el mayor nivel de incertidumbre de las estimaciones, seguida por la región Norte. Es la región Sur la que presenta el nivel más bajo de incertidumbre. Esto tiende a dar certeza a las estimaciones que demostrarían que la mayor depresión de los acuíferos habría ocurrido en las provincias patagónicas entre 2002 y 2024.

	Norte					Pampas					Cuyo		Sur					
	Selva Paranaense	Chaco Húmedo	NOA Altoandino	NOA Desértico	Chaco Semiárido	Pampa Húmeda	Pampa Subhúmeda	Pampa Semiárida	Pampa Desértica	Pampa Agrícola	Cuyo Subandino	Cuyo Desértico	Patagonia Norte Subandina	Patagonia Norte Desértica	Patagonia Centro Subandina	Patagonia Centro Desértica	Patagonia Sur Subandina	Patagonia Sur Desértica
Pendiente b	1,60	-8,73	3,44	-1,25	-25,92	-4,53	-18,62	-17,99	-10,69	-4,10	-8,96	-11,77	3,12	-6,90	-11,54	-4,33	-23,96	-25,92
Promedio (EWT-RZSM)	-647,56	254,02	-139,78	-149,72	-361,49	-215,55	-324,94	-353,15	-264,53	269,57	-299,79	-285,78	-483,12	-332,38	-359,74	-298,84	-488,24	-361,49
Error estándar	43,36	85,80	16,05	14,17	23,22	52,46	74,58	118,63	81,49	40,51	63,94	49,71	33,62	49,97	18,01	19,77	14,36	23,22
% Error st/promedio	6,70	33,777	11,48	9,46	6,42	24,34	22,95	33,59	30,81	15,03	21,33	17,39	6,96	15,03	5,01	6,62	2,94	6,42
Incertidumbre (% Máx)	19,82	100,00	33,99	28,01	19,02	72,05	67,96	99,45	91,20	44,49	63,14	51,49	20,60	44,51	14,83	19,59	8,71	19,02
Nivel de incertidumbre	BAJO	ALTO	MEDIO	BAJO	BAJO	ALTO	ALTO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	BAJO	MEDIO	BAJO	BAJO	BAJO	BAJO

**Cuadro 7.** Una estimación del nivel de incertidumbre respecto a las fuentes sub-superficiales de agua en 18 ecosistemas relevantes de Argentina aportadas por la Misión GRACE y GRACE-FO (EWT, Espesor del Equivalente Agua) y el modelo hidrológico GLDAS (RZSM, Humedad del suelo en zona radicular) de la plataforma Giovanni de la NASA. De acuerdo al procedimiento aplicado (ver síntesis metodológica), los mayores índices de incertidumbre se localizan en las ecorregiones de la región Pampas, y los más bajos en los ecosistemas de Patagonia (región Sur).

Cuando se proyectan los patrones de tendencia de los acuíferos en las grandes regiones, la **Figura 15** muestra tendencias negativas en todos los casos, pero con diferencias contrastantes entre el Norte, el Centro y el Sur de Argentina. Las pendientes de regiones Centro y Sur fueron muy significativas ( $P < 0,01$ ) mientras la de región Norte fue solo significativa ( $P < 0,05$ ). La región Sur es la que muestra, como en los indicadores anteriores, la pendiente negativa más empinada y el menor error estándar, lo cual puede interpretarse como una señal inequívoca de que los acuíferos patagónicos decaen con mayor rapidez en el Sur que en las restantes dos regiones.

Idealmente, estas tendencias relativas deberían ser validadas con datos piezométricos de campo, que no siempre existen en nuestras redes de evaluación. Pero las señales registradas en este estudio sugieren la necesidad de estrategias específicas de administración de los acuíferos en distintas regiones y ecorregiones del territorio argentino. Quizás haya áreas que admitan una mayor tasa de extracción de agua que otras (como en la región Norte), pero la tendencia indica un paulatino declive de los acuíferos en buena parte del territorio nacional. Los efectos de esta declinación sobre la calidad del agua deberían ser analizados independientemente en cada caso con información de campo y de laboratorio. Particularmente preocupante resulta el destino de los acuíferos subterráneos en gran parte de la Patagonia, sobre todo en la provincia de Santa Cruz, que parece ser la más afectada de acuerdo a los resultados de esta investigación.



**Figura 15.** Patrón regional del Nivel de los Acuíferos Sub-superficiales (base=100) en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Las pendientes de regiones Centro y Sur fueron muy significativas ( $P<0,01$ ) mientras la de región Norte fue significativa ( $P<0,05$ ). La región Sur es la que muestra la pendiente negativa más empinada y el menor error estándar, lo cual sería una señal inequívoca de que los acuíferos patagónicos decaen con mayor rapidez que en las restantes dos regiones.

## 8. La montaña, la nieve y el agua edáfica

El deshielo de los glaciares mantiene el caudal de las cuencas montañosas durante las sequías, pero el continuo retroceso glaciar amenaza esta capacidad fundamental. Ayala et al. (2026) evaluaron la respuesta de los glaciares de los Andes australes a una de las sequías más severas, persistentes y extensas registradas entre 2010 y 2025, y a las mega-sequías que los autores proyectan para finales de siglo. Esas proyecciones climáticas indican un aumento de la temperatura del aire, con la consecuente pérdida masiva de volumen de hielo en los glaciares. Mediante simulación, proyectaron las consecuencias de mega-sequías hacia finales de este siglo 21. Sus cálculos pronostican que el deshielo anual y estival podría disminuir el volumen de hielo entre 20% y 48 % en comparación con los niveles anteriores a 2010. El deshielo de los glaciares estabiliza y mantiene el caudal de las cuencas montañosas durante las sequías, pero su continua retracción amenaza esta función imprescindible. En términos prácticos este retroceso implicaría un debilitamiento de la capacidad amortiguadora de los glaciares y resentiría la oferta de agua para los medios de subsistencia en las regiones montañosas de la región andina central de Argentina los ecosistemas regionales.

Desde el año 2010 empezaron a disminuir las nevadas extremas y abundantes en los Andes centrales (Avramow, 2026), la cual es denominada la “sequía del milenio” por los expertos (Garraud et al., 1017). Toum, Villalba y Masiokas, (2025), investigadores del IANIGLIA-CONICET, indican que el volumen de nieve habría decrecido un 30% en la década

1990-2000. El calentamiento atmosférico global explica una parte de este comportamiento (Ayala et al., 2025).

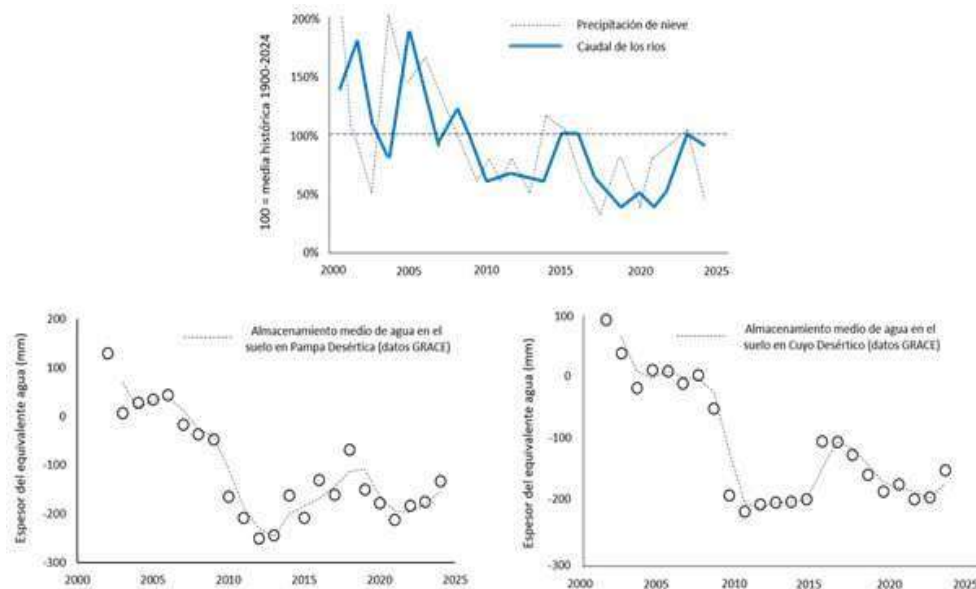
En su nota, Avramow (2026) presenta una impactante comparación de dos imágenes (**Figura 16**) que muestran la cobertura de nieve en un año de abundante precipitación (2005) y en un año de sequía extrema (2021). Si bien no se cita la fuente original de estas imágenes, es probable que sean un producto de reconstrucción satelital MODIS/NASA procesados por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET) junto con el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia dentro de un proyecto denominado Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile. Dos referencias metodológicas importantes para interpretar este fenómeno son Cara et al. (2021) y Saavedra et al. (2026).

Según describen Cara et al. (2021), El Observatorio de Nieve analiza la evolución de la cubierta de nieve en las principales hídricas de Argentina y Chile en los Andes centrales subtropicales (27°-37°S). La información de nieve es obtenida a través del sensor MODIS que portan los satélites Terra y Aqua de la NASA. Utilizando una metodología similar, Saavedra et al. (2026) reportan que la acelerada pérdida de nieve estacional en los Andes Centrales tiene profundas implicaciones para la seguridad hídrica en regiones donde el deshielo es un aporte hidrológico dominante.



**Figura 16.** Composición de imágenes satelitales que muestran la extensión de la cobertura de nieve en 2005 (sin mega-sequía) y 2021 (con mega-sequía). Fuentes: IANIGLIA-CONICET (2026) y Avramow (2026).

¿En qué medida la precipitación de nieve en la montaña afecta el almacenamiento hídrico en ecorregiones adyacentes? Seguramente esta pregunta no tiene una respuesta sencilla.



**Figura 17.** Arriba: Relación entre el promedio de nevadas y el promedio del caudal de los ríos en % de la media histórica 1900-2024 (fuente: Masiokas-IANIGLIA (2026) y Avramow (2026). Abajo: reserva hídrica promedio de las áreas desérticas de las ecorregiones Pampas y Cuyo según datos de la misión GRACE. Con cierta dilación temporal, estas reservas tienden a replicar el formato de la precipitación de nieve y el caudal de los ríos en los Andes centrales entre 2002 y 2024.

Combinando los datos de precipitación nival y caudal de ríos de Masiokas (2026) y de almacenaje hídrico de la misión GRACE en suelos de dos áreas desérticas (de las ecorregiones Pampas Cuyo) adyacentes a la región andina central entre 2002 y 2024, es posible plantear como interrogante si existe algún grado de correlación entre ambas fuentes de datos (Figura 17). Con una cierta dilación en el tiempo, los datos de almacenaje hídrico en las dos áreas desérticas tienden a reproducir el formato y la declinación que previamente registraron las precipitaciones de nieve en la montaña y el caudal de los ríos en las cuencas hidrográficas de los Andes centrales. Sería demasiado simplista concluir que existe una conexión entre nieve caída, caudal de los ríos y almacenaje hídrico en áreas desérticas. Sabido es que estas variables son afectadas por otros factores, entre ellos la temperatura, las lluvias, la evapotranspiración, la estructura de los suelos y la propia cobertura vegetal de las áreas analizadas. No obstante, parece lícito abrir una hipótesis acerca de una potencial correlación en la cual una fracción imprecisa del agua de nieve, una vez licuada por la temperatura, termine infiltrada en los suelos y transportada a áreas desérticas adyacentes como humedad superficial del suelo y como agua sub-superficial que contribuye a al almacenaje de los acuíferos subterráneos. Estos cambios en la acumulación hídrica en los suelos son detectados con precisión por los sensores de la misión GRACE. No deja de ser llamativo el hecho de que la declinación en las precipitaciones de nieve sea acompañada en el tiempo por una declinación del almacenaje hídrico de los suelos en áreas geográficamente cercanas.

## 9. Trasponiendo escalas: De la ciencia a la estrategia

Integrar el conocimiento científico con la praxis decisonal nunca ha sido algo sencillo y mucho menos automático. La ciencia y la decisión raramente hablan el mismo idioma y están apremiadas por urgencias distintas.

Aunque la tensión entre ambas esferas es inevitable, este estudio intenta conectar la hidrología desde una perspectiva científica y técnica, con problemáticas económicas, sociales y ambientales que urgen a los agentes de decisión. Los niveles y escalas de abordaje plantean una primera dificultad porque se vinculan directamente a la gestión hidrológica. Comunicar procesos que ocurren a escalas distintas es una primera limitación al entendimiento. En un planeta asediado por el calentamiento atmosférico y el cambio climático global no resulta sencillo vincular las disparidades hídricas espaciales y temporales a intereses estratégicos y políticos que tienen efectos directos sobre la sociedad.

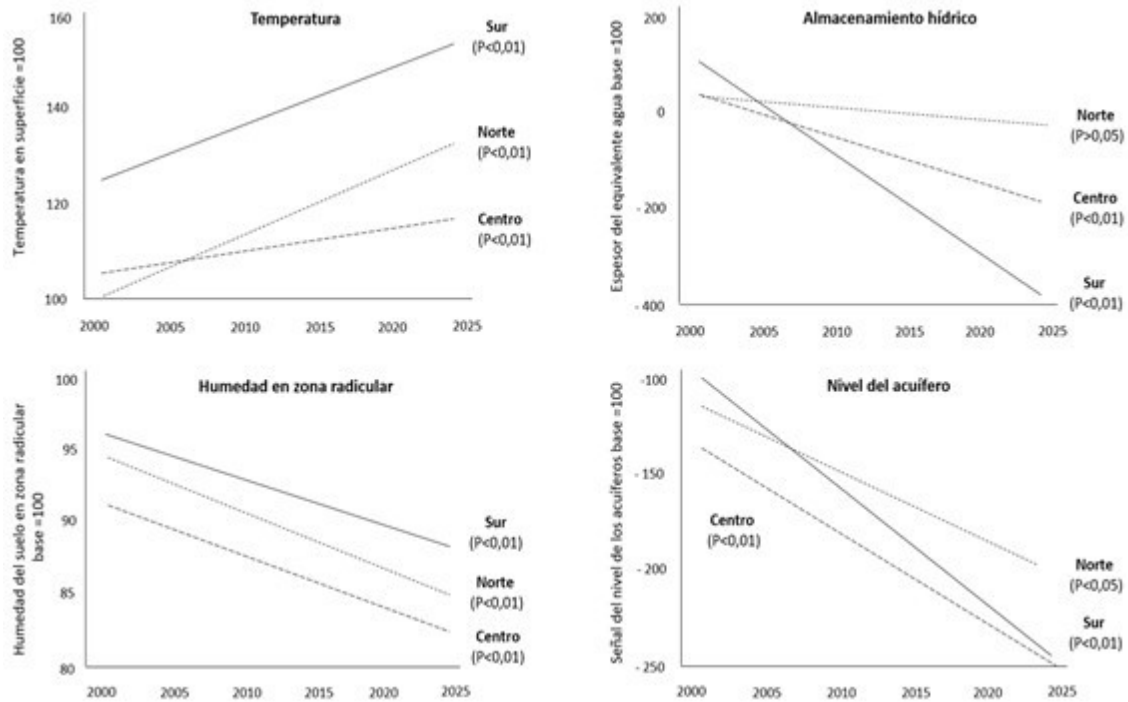
Quienes investigan estos temas advierten acerca de la existencia de procesos escaladependientes, de respuestas no lineales a través de las escalas y de asimetrías territoriales que suelen ser fuente de conflictos transfronterizos actuales o potenciales.

El calentamiento y el cambio climático global, y la creciente intervención humana sobre los ecosistemas, tensionan aún más la problemática hídrica. El análisis de la dinámica hídrica bajo el estrés climático y antrópico permite interpretar la problemática hidrológica y medir la resiliencia de los sistemas naturales y los antropizados. La disponibilidad creciente de datos satelitales y productos modelados (como proveen la plataforma Giovanni de la NASA y la misión GRACE) permite hoy abordar estas dinámicas bajo una extensa cobertura espacial y temporal. Sin embargo, estos enfoques no sustituyen a las mediciones sitio-específicas tradicionales, sino que las complementan. Mientras las mediciones de amplia escala espacial capturan señales regionales y sub-regionales a través del tiempo, las evaluaciones in-situ aportan precisión y validan datos a escala local. La integración no excluyente de ambos enfoques confiere robustez al diagnóstico y precisión contextual a la interpretación de los resultados.

Dos escalas dominantes conforman este estudio: una escala regional de extensa cobertura espacial que divide al país en tres grandes regiones (Norte, Centro y Sur), y en las cuales se definen grandes patrones hídricos que dominan en cada región. Y una escala menor que involucra a 18 ecorregiones en las cuales, más allá del patrón hídrico que define la región, emergen funciones hídricas específicas sujetas a interpretación. Ambas escalas cuentan distintas historias, y al trasponerlas aparece una diversidad de comportamientos hídricos diferentes, y desvíos de gran magnitud que requieren una interpretación específica. La gestión de los recursos hídricos exige conocimientos y habilidades distintas al pasar de

una escala a otra, y es el conocimiento científico el que puede enriquecer el ecosistema decisional en ese pasaje.

En una primera aproximación a la escala más extensa que involucra a las regiones Norte, Centro y Sur, resulta útil evaluar algunos de los grandes patrones que dominan el escenario climático e hidrológico. En la Figura 18 se muestran cuatro de ellos: la temperatura en superficie, el almacenamiento de agua en los suelos, la humedad en la zona radicular del suelo y la señal de nivel de los acuíferos subterráneos.

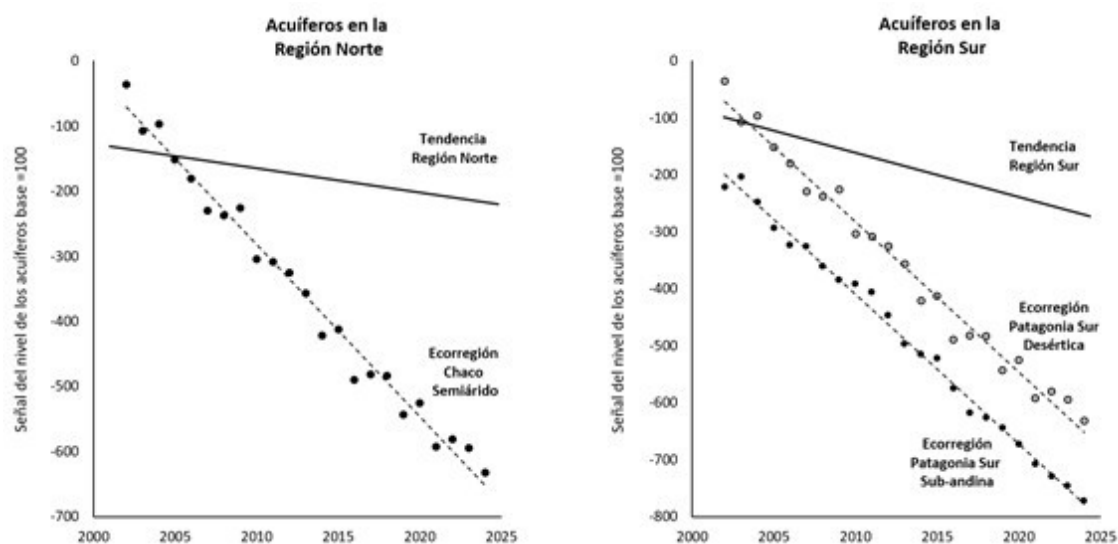


**Figura 18.** Patrones regionales de cambio en una variable climática y tres variables hídricas en el Norte, Centro y Sur de Argentina entre 2002 y 2024. Entre paréntesis: significancia estadística de la pendiente b.

Se aprecia un comportamiento con ciertas tendencias homogéneas que vale la pena analizar. La temperatura en superficie es un indicador que parece afectar sensiblemente la funcionalidad de las variables hídricas en el período 2002-2024. Aumenta significativamente ( $P < 0,01$ ) en las tres regiones, aunque las pendientes positivas fueron más empinadas en las regiones Sur y Centro que en la región Norte. El almacenamiento hídrico en los suelos parece guardar una relación inversa a la de la temperatura. Se observa una caída notoria de los almacenajes en las tres regiones, pero mientras no resultó significativa ( $P > 0,05$ ) en el Norte, sí lo fue ( $P < 0,01$ ) en las regiones Centro y Sur, con una pendiente negativa mucho más notoria en el Sur. La humedad en zona radicular tuvo una declinación pareja con pendientes negativas muy significativas ( $P < 0,01$ ) de distinta magnitud en las tres regiones. El nivel de los acuíferos también declinó con tendencias negativas muy significativas ( $P < 0,01$ ) en las regiones Sur y Centro, y significativas ( $P < 0,05$ ) en la región Norte.

En medio de estas tendencias aparece un fenómeno llamativo que demanda creciente interés e interpretación científica. En tanto ocurren tormentas con lluvias más intensas que provocan inundaciones y anegamientos en varias regiones del planeta, el desecamiento de los suelos y el almacenaje hídrico profundo tienden a declinar. Este fenómeno ha comenzado a ser estudiado recientemente (Jurado y Matthes, 2025; Huba et al., 2026; Lesk y Mankin, 2026) y esos estudios preliminares concluyen en que las lluvias muy intensas favorecen un escurrimiento superficial acelerado y anegamientos e inundaciones de zonas bajas o de escasa pendiente. Pero al mismo tiempo que la elevada velocidad de circulación del agua superficial acumula los excesos en áreas inundables, tiende a reducir la infiltración y el almacenaje profundo de agua en los suelos. Ese proceso que ocurre en superficie, sumado al aumento de temperatura superficial, mayor evapotranspiración y balance hídrico negativo, explicarían la tendencia a una pérdida de almacenaje hídrico en los suelos. Surgen así interpretaciones aleatorias que confunden a la opinión pública y a los medios: suena contradictorio que, mientras ocurren inundaciones debidas a tormentas intensas y más frecuentes en el este de la pradera pampeana, los suelos de la región experimentan pérdidas de largo plazo en sus reservas hídricas. Sin duda, se necesitan más estudios y mediciones para validar estas tendencias.

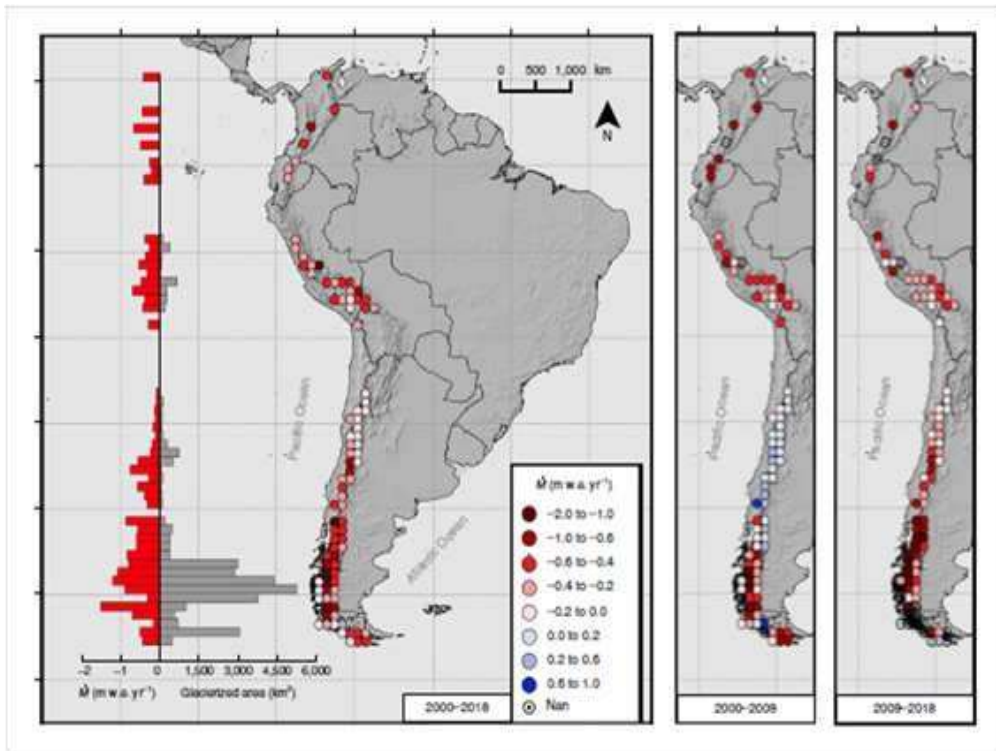
Al descender a un nivel en la escala espacial, los comportamientos hídricos de las ecorregiones pueden diferir drásticamente, ya que los promedios regionales tienden a atenuar y enmascarar la variabilidad dentro de las ecorregiones. En el caso del nivel de los acuíferos aparecen tres casos extremos de ecorregiones que se apartan abruptamente de las medias regionales (**Figura 19**).



**Figura 19.** Trasposición de escalas (de región a ecorregión) y desvío estadístico de algunas ecorregiones respecto a la tendencia media del nivel de los acuíferos en la región que las contiene. Se aprecian dos desvíos de gran magnitud: la ecorregión Chaco Semiárido en la región Norte, y las ecorregiones Patagonia Sur Subandina y Patagonia Sur Desértica en la región Sur.

Estos fenómenos atípicos pueden ser motivo de distintas interpretaciones. Estos desacoples que se detectan al trasponer escalas son, probablemente, mucho más relevantes para la gestión territorial que las medias regionales por sí solas. La misión GRACE acredita una robusta capacidad técnica para capturar esa disfuncionalidad hídrica a escalas menores. Es posible que los desvíos extremos respecto de la media regional no son un simple “ruido” estadístico, sino la expresión de procesos biofísicos reales y profundos. Al trasponer escalas en áreas hidrológicamente sensibles, es probable que emerjan no linealidades que manifiestan una respuesta desproporcionada ante un cambio en el entorno. Una hipótesis plausible es que la disfuncionalidad aumenta cuando un ecotono hidrológicamente frágil experimenta un estrés climático o ecológico.

Esos dos grandes desvíos en el extremo austral de la Patagonia probablemente revelan una dinámica hidrológica distinta a la registrada por GRACE en la región Sur. La ecorregión Subandina depende fuertemente de la nieve acumulada, del aporte de los glaciares, del deshielo estacional, y de la recarga lenta de los acuíferos cordilleranos. Como mostraron otros autores (Dussailiant et al. 2019), a raíz del calentamiento atmosférico los Andes australes sufren desde la década de 1980 una retracción sostenida de glaciares, una menor persistencia de la nieve y los campos de hielo (**Figura 20**), lo cual conlleva un mayor escurrimiento a una pérdida neta de almacenamiento hídrico continental.



**Figura 20.** Dos décadas de pérdida anual de la masa de hielo y metro de equivalente-agua en glaciares andinos. La retracción se incrementa hacia el sur de la región andina (Fuente: Dussaillant et al., 2019).

Se puede suponer que ocurre una señal negativa fuerte en el espesor del equivalente de agua que detecta GRACE. El extremo Sur Desértico probablemente esté mostrando un comportamiento más sensible porque combina precipitaciones muy bajas, alta exposición al viento y elevada evapotranspiración, escasa recarga, acuíferos someros y poco renovables, y una fuerte dependencia de aportes andinos indirectos. El gran desvío respecto a la tendencia media de la región Sur podría interpretarse como una amplificación de efectos típicos de los sistemas áridos. En ambientes de extrema escasez hídrica, un pequeño aumento de evapotranspiración puede causar una fuerte reducción del agua almacenada en el suelo.

Por lo tanto, en el Norte (Chaco Semiárido), la señal del desvío parece vincularse al desmonte y a la rápida expansión agropecuaria, mientras que en Patagonia Sur la señal estaría asociada a la pérdida de agua criosférica y al efecto de la aridez ecorregional. Se trata de dos mecanismos biofísicos distintos que conducen a un resultado parecido.

Dentro de las tendencias regionales negativas en la señal de los acuíferos subterráneos, al traspasar la escala se detectan los casos de ecorregiones que, de acuerdo a los datos de la misión GRACE, habrían expresado ganancias hídricas. En esas categorías aparecen la Selva Paranaense y el NOA Altoandino en la región Norte, la Pampa Agrícola en la región Centro, y Patagonia Norte Subandina. Por otro lado, aparecen como ecorregiones estabilizadas el Chaco Húmedo en la región Norte, y la Pampa Húmeda en la región Central.

La trasposición de escalas deja enseñanzas que sirven tanto al conocimiento científico como a las estrategias hídricas y la gestión hidrológica en los gobiernos nacional y provinciales. Desde una perspectiva científica, las propiedades hídricas emergentes a distinta escala espacial y temporal permiten avizorar tendencias de largo plazo e identificar las ecorregiones más y menos vulnerables a la variabilidad climática. Estos conocimientos son un insumo clave para el diseño de estrategias hídricas a escala nacional y regional y provincial. Asimismo, permiten evaluar en su verdadera dimensión los cambios que experimentan los glaciares, los ambientes peri-glaciares y los acuíferos subterráneos como reguladores hídricos, como fuentes y como reserva estratégica de agua dulce para el consumo, la producción agropecuaria e industrial. Y también dimensionar su influencia sobre sistemas que trasladan el recurso hídrico más allá de los límites políticos y administrativos, sean regionales, provinciales y aún internacionales. Conocer a priori estos atributos sirven para tratar y prevenir conflictos transfronterizos que se agudizan en todo el mundo (Trimble et al., 2022).

## Referencias

- Alley, W.M. and Konikow, L.F. (2015), Bringing GRACE Down to Earth. *Groundwater*, 53: 826-829. <https://doi.org/10.1111/gwat.12379>
- Alley, W., and Leake, S.A., 2004, The Journey from Safe Yield to Sustainability: *Ground Water*, v. 42, no. 1, p. 12-16, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x>.
- Alley, W., Reilly, T.E., and Franke, O.L. (1999), Sustainability of ground-water resources: U.S. Geological Survey Circular 1186, v, 79 p. :col. ill., col. maps ;28 cm., <https://doi.org/10.3133/cir1186>.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
- Avramow, M. (2026) ¿Se termina la nieve? De pistas de esquí a suelos secos: proyecciones preocupantes sobre una tendencia que se acelera. *Diario La Nación* (20-05-2026). Disponible en LA NACION - artículo original
- Ayala, Á., Muñoz-Castro, E., Farinotti, D. et al. (2025). Less water from glaciers during future megadroughts in the Southern Andes. *Commun Earth Environ* 6: 860. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02845->
- Bolaños, S., Salazar, J.F., Betancur, T., Werner, M. (2021). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology* 596: 125687.
- Blöschl, G., Chaffe, P.L.B. (2023). Water scarcity is exacerbated in the south. *Science* 382: 512-513. DOI: 10.1126/science.adk8164

Cara, L., Masiokas, M., Villalba, R. et al. (2021). Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile. IANIGLA-CONICET y Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>. DOI: 10.13140/RG.2.2.11321.70245.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. Editorial McGraw-Hill, New York, pp. 530-537.

Davie, T., Wyndham Quinn, N. (2019). Fundamentals of Hydrology (Third Edition). Routledge 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4RN, 306 pp.

Dingman, S.L. (2008) Physical hydrology (2nd edition). Prentice Hall, New Jersey, 600 pp.

Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F. et al. Two decades of glacier mass loss along the Andes. Nat. Geosci. 12, 802–808 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>

Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R. et al. (2015). Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies, Hydrol. Earth Syst. Sci. 19: 4229–4256, <https://doi.org/10.5194/hess-19-4229-2015>

Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 358: 2037–2049.

Falkenmark, M. (2004). Towards integrated catchment management: opening the paradigm locks between hydrology, ecology and policy-making. International Journal of Water Resources Development 2: 275–281.

Falkenmark, M., Rockström, J. (2006). The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. Journal of Water Resources Planning and Management 132(3), 129–132.

Famiglietti, J.S. (2014). The global groundwater crisis Nature Climate Change 4: 945–948. DOI: 10.1038/nclimate2425

Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J. et al. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. Hydrol. Earth Syst. Sci. 21: 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>

Green, T. R. (2011). Beneath the Surface of Global Change: Impacts of Climate Change on Groundwater. Journal of Hydrology 405: 532-560. DOI

Huba, J. C., Boutt, D.F., Moran, B.J. et al. (2026). “Shifting Hydrologic Pathways in Temperate Forest Headwaters under a Changing Climate.” Hydrological Processes 40: e70532. <https://doi.org/10.1002/hyp.70532>.

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D. et al. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. Nature 625: 715–721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>

Jurado, S., Matthes, J. (2025). Increasing large precipitation events and low available water holding capacity create the conditions for dry land-atmosphere feedbacks in

- the Northeastern United States. *Water Resources Research* 61 : e2024WR038600. <https://doi.org/10.1029/2024WR038600>
- Keys, P.W., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., et al. (2019). Invisible water security: Moisture recycling and water resilience. *Water Security* 8: 100046.
- Karandish, F., Liu, S., de Graaf, I.E.M. (2025). Global groundwater sustainability: A critical review of strategies and future pathways. *Journal of Hydrology* 657: 133060. DOI:10.1016/j.jhydrol.2025.133060
- Kløve, B., Allan, A., Bertrand, G. et al. (2011). Groundwater dependent ecosystems. Part II. Ecosystem services and management in Europe under risk of climate change and land use intensification. *Environ. Sci. Policy* 14 : 782–793.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G. et al. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *J. Hydrology* 518: 250–266.
- Koster, R. D., Dirmeyer, P. A., Guo, Zh., et al. (2004). Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305 : 1138–1140. DOI: 10.1126/science.110021
- Lesk, C.S., Mankin, J.S. (2026). More concentrated precipitation decreases terrestrial water storage. *Nature* 653: 425–432. <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10487-7>
- Luo, X., Li, Sh., Yang, W., et al. (2023). Spatio-temporal changes in global root zone soil moisture from 1981 to 2017. *Journal of Hydrology*, 626 (part B), 130297. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130297
- NASA (2015). A Little Bit of Water, A Lot of Impact. NASA Earth Observatory. Soil Moisture Overview. <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/a-little-bit-of-water-a-lot-of-impact/>
- Ojha, N., Mahmoodi, A., Mialon, A. et al. (2024). Assessment of SMOS Root Zone Soil Moisture: A comparative study using SMAP, ERA5, and GLDAS. *IEEE Access*, pp.76121-76132. (10.1109/ACCESS.2024.3404123). (hal-04607530v2)DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3404123
- Pereira, A.; Pacino, MC (2012); Annual and seasonal water storage changes detected from GRACE data in the La Plata Basin; Elsevier Science; *Physics of the Earth and Planetary Interiors*; 212-213; 12-2012; 88-99
- Rodell, M., Barnoud, A., Franklin R Robertson, F.R. et al. (2024). An Abrupt Decline in Global Terrestrial Water Storage and Its Relationship with Sea Level Change. *Surveys Geophys* 45: 1875–1902. doi: 10.1007/s10712-024-09860-w
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., et al. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society* 85: 381–394.
- Rodrigues Capitulo, L., Espínola, L.A., Yoya, F. et al. (2022). Basis to study the alterations of the hydrological regime and its ecological importance in Argentina. *Ecología Austral* 32: 195-296. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.1.1.1219>

Rodríguez-Iturbe, I. (2019). *Ecohydrology: Darwinian Expression of Vegetation Form and Function*. Cambridge University Press, 350 pp.

Saavedra F., Hernández-Duarte A., Caro A. et al. (2026). Spatial and temporal variability of snow in the Andes using MODIS snow product 2000–2025. *Front. Earth Sci.* 14: 1564035. doi: 10.3389/feart.2026.1564035

Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change* 3 : 322–329.

Teng, W., Rui, H., Vollmer, B., et al. (2014). *NASA Giovanni: A Tool for Visualizing, Analyzing, and Inter-comparing Soil Moisture Data*. Goddard Space Flight Center, Report/Patent No. GSFC-E-DAA-TN13917. DOI: 10.1002/9781118872086.ch20

Thomann, A.D. Werner, D.J. Irvine, M.J. (2022). Developing adaptive management guidance for groundwater planning and development. *J. Environmental Management* Volume 322: 11605. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116052>

Thornthwaite, Ch.W., Mather, J.R. (1955). *The Water Balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Philadelphia Laboratory of Climatology, Centerton, N.J. Publications in climatology, Vol. 8, N° 1, 104 pp.

Toum, E., Villalba, R. and Masiokas, M.H. (2025). Snow and Glacier Contributions to the Mendoza River in the Semiarid Central Andes of Argentina. *Hydrological Processes*, 39: e70132. <https://doi.org/10.1002/hyp.70132>

Trimble, M., Olivier, T., Anjos, L. A. P., Dias Tadeu, N., Giordano, G., Mac Donnell, L., Laura, R., Salvadores, F., SantanaChaves, I. M., Torres, P. H. C., Pascual, M., Jacobi, P. R., Mazzeo, N., Zurbriggen, C., Garrido, L., Jobbágy, E., & Pahl-Wostl, C. (2022). How do basin committees deal with water crises? Reflections for adaptive water governance from South America. *Ecology and Society*, 27(2), 42. <https://doi.org/10.5751/ES-13356-270242>

Zhang, Y., Li, C., Chiew, F.H.S. et al. (2023). Southern Hemisphere dominates recent decline in global water availability. *Science* 382: 579-584. DOI: 10.1126/science.adh07

Vereecken, H., Amelung, W., Bauke, S. L. et al. (2022). Soil hydrology in the Earth system. *Nature Reviews* 3: 573-587. doi: 10.1038/s43017-022-00324-6 Available at <https://centaur.reading.ac.uk/105378/>

## Anexo metodológico

En general, las metodologías tradicionales para evaluar y medir tendencias hídricas en los suelos se materializaron físicamente en sitios específicos, y generaron información y datos muy valiosos para dilucidar tendencias temporales en esos puntos geográficos. Las redes de medición instrumentadas por organismos como el INTA, el CONICET, las Universidades públicas o el SMN hicieron un aporte fundamental para interpretar la dinámica hidrológica en esos sitios.

Argentina es un país extenso. La superficie total de la República Argentina es de 376.127.400 hectáreas, incluyendo la parte continental americana y el sector antártico e islas del Atlántico Sur. Es el octavo país más grande del mundo y el segundo de América del Sur. Esto implica reconocer que las evaluaciones sitio-específicas, puntuales, inevitablemente omiten espacios territoriales significativos. En esos espacios ocurren eventos que no son capturados por las metodologías físicas (experimentos, ensayos, mediciones, etc.). Mirado desde otras perspectivas, el análisis de grandes áreas territoriales aporta un componente espacial adicional, ya que incorpora datos promedio que complementan las mediciones puntuales que surgen en cada sitio monitoreado.

Para evaluar espacios territoriales extensos es necesario recurrir a otras fuentes de información y de datos. El denominado proyecto Giovanni (acrónimo de Geospatial Interactive Online Visualization and ANd analysis Infrastructure) es una interfaz web avanzada desarrollada por el Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) de la NASA. Funciona como una plataforma abierta que permite visualizar, analizar y acceder a enormes volúmenes de datos científicos de la Tierra, derivados de satélites, algoritmos y modelos. Giovanni fue creado con el objetivo principal de tender un puente entre los datos satelitales y la ciencia (denominado The Bridge Between Data and Science), facilitando la investigación científica y la toma de decisiones basada en grandes bases de datos. Sus objetivos y prestaciones incluyen i) facilitar el acceso abierto a datos satelitales y productos de modelación, ii) Acelerar el análisis y procesamiento de datos (Big Data Analysis), iii) permitir estudiar fenómenos de amplio alcance espacial como precipitación, temperatura de superficie, evapotranspiración, humedad del suelo, sequías, inundaciones, cambios en las masas hídricas, etc., iv) analizar tendencias a largo plazo, variaciones estacionales e interanuales de variables atmosféricas y oceánicas.

En esta investigación el interés se focalizó en el estudio de variables vinculadas a la hidrología de los suelos y sus factores desencadenantes en Argentina mediante el abordaje y exploración de dimensiones temporales y espaciales no convencionales.

## Fuentes de datos y lógica de las herramientas utilizadas

Algo de historia: El Sistema Giovanni surge en la NASA a comienzos de tercer milenio, con publicaciones técnicas en 2007 que describen su funcionamiento operativo. En la práctica, no es una fuente primaria de datos, sino una infraestructura web que permite acceder a datos satelitales y de modelos, analizarlos on-line y generar productos clave para el conocimiento científico y la toma de decisiones, como mapas, series temporales, perfiles, etc. La información y datos que provee provienen de los repositorios de la NASA (Earthdata) y opera sobre bases de datos ya procesados.

Por otro lado, tenemos la Misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), que se desarrolló entre 2002 y 2017. Gracias a su éxito inicial, en 2018 se lanzó la misión GRACE Follow-On para continuar estas mediciones, incluyendo tecnología láser de mayor precisión. Este sistema tiene por objetivo cartografiar con alta precisión variaciones del campo gravitatorio y detectar cambios en la masa terrestre, en especial el almacenamiento de agua total (TSW, Total Water Storage) en un plano horizontal y vertical. GRACE es una misión satelital conjunta entre la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán, que funciona en base a dos satélites gemelos (bautizados Tom & Jerry) que se desplazan uno detrás del otro en la misma órbita. Al pasar sobre variaciones de masa (como montañas o acuíferos), con precisión micrométrica logra medir la distancia entre ellos a través de un sistema de microondas capaz de detectar alteraciones en la gravedad. Mediante este funcionamiento es posible, entre otras cosas, monitorear cambios en acuíferos subterráneos y cuencas hidrográficas, medir el derretimiento de glaciares y capas de hielo en montañas y polos, y analizar la elevación del nivel del mar debido al derretimiento de hielo y la expansión térmica.

Aunque operan a escalas espaciales distintas, Giovanni y GRACE se relacionan de manera indirecta. Mientras Giovanni opera modelos de superficie (genéricamente denominados GLDAS), la incorporación de datos aportados por GRACE permite ampliar las prestaciones de Giovanni para calcular y ajustar, por ejemplo, otras variables como el balance hídrico. A través de Giovanni es posible recortar una grilla geográfica de interés, definir una ventana temporal, y analizar datos numéricos de interés para el usuario. El sistema Giovanni opera en base a promedios de espacio (cientos a miles de hectáreas) y tiempo (series de datos mensuales o anuales). Una tercera dimensión incluye perfiles verticales del suelo.

## Formato conceptual del estudio y base de datos analizada

Las variables analizadas en este estudio fueron obtenidas a través de datos del sistema GLDAS (Global Land Data Assimilation System), que es una herramienta web potente para visualizar, analizar y descargar datos hidrológicos y meteorológicos terrestres de alta resolución. GLDAS integra datos de observaciones satelitales y terrestres con modelos de superficie avanzados. Genera conjuntos de datos "forzados" (un mecanismo de cálculo que representa cambios atmosféricos en meteorología y "simulados", como el cálculo de humedad del suelo, evapotranspiración, etc.). Los productos GLDAS en Giovanni suelen tener resoluciones espaciales de 0.25° (770 a 777 hectáreas) o de 1° (unas 12.300 hectáreas). Estas áreas varían con la latitud: son máximas en el ecuador, y tienden a cero a medida que la latitud se aproxima a los polos. Por lo tanto, para calcular las áreas seleccionadas es necesario hacer una conversión vinculada a la latitud.

([https://es.scribd.com/document/514278040/analisis-y-decripcion-general-de-laplataforma-GIOVANNI#google\\_vignette](https://es.scribd.com/document/514278040/analisis-y-decripcion-general-de-laplataforma-GIOVANNI#google_vignette))

Los modelos GLDAS son conocidos como "modelos de superficie", que simulan el intercambio de agua y energía en la superficie terrestre

(<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/gldas#>). Los modelos de superficie corresponden a la opción NOAH (NOAH = Noah Land Surface Model) y son evolutivos: por ejemplo, el modelo GLDAS-2.0 cubre una serie temporal basada en forzamiento meteorológico de Princeton desde 1948 hasta 2014. El modelo GLDAS-2.1 es una versión actualizada que combina conjuntos de datos de radiación con datos disponibles desde el año 2000 hasta la actualidad. La versión GLDAS 2.1 tiene mayor realismo físico y datos hidrológicos mejor calibrados, y por lo tanto más confiables, desde comienzos del siglo 21. Sintetizando, ambos productos usan el mismo modelo físico (Noah), pero la diferencia crítica es el tipo de forzamiento climático. En tanto la versión GLDAS 2.0 es una reconstrucción homogénea (climatológica), la versión GLDAS 2.1 incluye un componente observacional, lo que le confiere una evaluación más realista.

En este estudio se acoplaron datos de ambos modelos con el objeto de cubrir completo el período 1950-2024. Ese acople no siempre es sencillo porque ambos modelos simulan procesos hídricos en base a distintas variables "forzantes". Existen métodos de acoplamiento desarrollados en la bibliografía, pero no fueron considerados para este estudio.

Las variables más relevantes ofrecidas por Giovanni incluyen Humedad del Suelo

(varias capas en vertical), Temperatura Superficial, Precipitación, Evapotranspiración, Intensidad del Viento, Radiación, Precipitación Nival y Espesor de la Nieve. Los datos crudos disponibles en la plataforma

Giovanni están disponibles en intervalos de 3 horas (3-hourly) y mensuales (monthly). En esta investigación recurrimos al análisis de series temporales de datos mensuales, los cuales fueron posteriormente promediados a valores anuales para visualizar tendencias multi-anales de las variables analizadas.

La base de datos fue extensa y requirió un uso intensivo del tiempo. Se analizaron datos de 7 variables hídricas seleccionadas durante 936 meses en 18 ecorregiones distintas de Argentina. Las tendencias finales fueron sometidas a un análisis sencillo de significancia estadística la evaluación de las pendientes a nivel del 5 % (significativas,  $P < 0,05$ ) y del 1% (muy significativas,  $P < 0,01$ ). Igualmente se detectaron las tendencias no significativas ( $P > 0,05$ ). Las ecorregiones fueron agrupadas en grandes bloques regionales (Norte, Centro y Sur) para la síntesis final. En la práctica, eso representó analizar una base de  $\approx 118.000$  datos en total.

Finalmente, las regiones Norte, Centro y Sur fueron comparadas sobre una referencia común de base 100 al año 2002 para unificar valores y visualizar grandes patrones geográficos de comportamiento hídrico a través del período 2002-2024. De esta manera es posible detectar y comparar patrones dominantes de tendencia de las temperaturas y lluvias en cada macro-región.

## **Variables evaluadas**

### **Precipitación**

Las misiones TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) y GPM (Global Precipitation Measurement) son iniciativas conjuntas de la NASA (EE. UU.) y JAXA (Japón), diseñadas para medir y monitorear la precipitación global (lluvia y nieve) a través de información satelital (<https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/giovanni#>). Los datos se generan mediante sensores y algoritmos de recuperación (<https://gpm-nasagov.translate.google.com/data/imerg/> ). El algoritmo de recuperación incluye técnicas de procesamiento que seleccionan, promedian, recortan y convierten grandes conjuntos de datos satelitales crudos en productos accesibles al usuario. El sistema combina datos de microondas e infrarrojos para ofrecer estimaciones de precipitación de alta resolución (cada 30 min,  $0.1^\circ$  de resolución espacial) que facilitan la elaboración de mapas de distribución de las lluvias con gran precisión. Giovanni no genera esta información, sino que la integra, la promedia y la torna disponible para estudios meteorológicos y climáticos.

Asimismo, el sistema permite confrontar la precipitación satelital estimada con las mediciones obtenidas de estaciones pluviométricas de superficie. Los datos resultan útiles para la agricultura, la gestión de recursos hídricos y evaluación de desastres climáticos. Los datos se



Los modelos de superficie simulan el balance hídrico del suelo a partir de variables de ingreso como precipitación, radiación, temperatura y viento, variables de salida como evapo-transpiración, escurrimiento, infiltración, y variables de almacenaje derivadas de la textura del suelo, porosidad, etc. necesarios para estimar la humedad a distinta profundidad (0 a 10, 10 a 40, 40 a 100, 100 a 200 cm).

Las unidades en un GLDAS típico de Giovanni se reportan de dos maneras: (i) contenido volumétrico ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), o ii) equivalente agua en  $\text{mm}/\text{m}^2$  por cada capa o estrato de suelo

Por lo tanto, Giovanni no realiza mediciones directas como la que genera un sensor sitio-específico, sino que es aporta una estimación integrada físicamente que estima balances hídricos y almacenamientos. En otros términos, es una solución numérica surgida a partir de la modelación del sistema suelo-vegetación-atmósfera.

### **Cambios en el Almacenaje de Agua (Datos de la Misión GRACE)**

Como se mencionó más arriba, los satélites gemelos GRACE (y su continuación, GRACEFO) no miden agua directamente; solo detectan variaciones temporales del campo gravitatorio terrestre. A partir de esas variaciones se infiere el cambio en la masa total almacenada en una región. En los estudios hidrológicos GRACE utiliza una unidad denominada Espesor de Agua Equivalente (EWT, Equivalent Water Thickness). El EWT (mm o cm) es el espesor de una lámina de agua que expresa la variación de masa detectada por ambos satélites (<https://gracefo.jpl.nasa.gov/science/water-storage/>).

Aunque no lo discrimina, GRACE incluye todos los componentes de almacenamiento hídrico, a saber, Humedad del Suelo, Agua Superficial, Agua Subterránea, Nieve y Agua contenida en Biomasa (casi insignificante). Como en muchas regiones como la pradera pampeana a la región chaqueña no hay nieve precipitada o acumulada, el componente hídrico dominante suele ser la suma entre la humedad del suelo y el agua subterránea. En esos modelos, el agua en biomasa suele estar parametrizada de forma muy simplificada, o directamente omitida, porque es una fracción muy pequeña y aparece imbricada con la humedad superficial del suelo. Todos los valores se refieren a una situación promedio que representa una línea de base de referencia (por ejemplo, un promedio 2004-2009) que describe la condición hídrica en ese período. El promedio 2004-2009 corresponde a un período relativamente estable del campo gravitatorio, soslayando así los primeros meses de la misión (2002-2003) en los cuales fue necesario realizar un ajuste instrumental de envergadura. Ese promedio fue luego adoptado como referencia por los principales centros de investigación hidrológica en el mundo.

Los valores positivos de almacenamiento deben ser interpretados como un aumento de masa hídrica que refleja un período húmedo con recarga

del perfil superficial del suelo y/o una recarga de acuíferos. Por ejemplo, +20 mm significa que, en promedio sobre una celda determinada de ~300 km, hay 20 mm más de agua almacenada que en el período base. Al contrario, los valores negativos de EWT indican pérdida de masa hídrica respecto al promedio, que pueden deberse a sequías prolongadas, sobreextracción de agua subterránea, o menor almacenamiento superficial y sub-superficial (<https://www.jpl.nasa.gov/news/study-third-of-big-groundwater-basins-in-distress/>). A modo de ejemplo, en la región pampeana argentina, en 2008–2009 GRACE produjo una señal negativa marcada; en 2015–2016 ocurrió una recuperación asociada a un El Niño fuerte; en 2020–2023 se dibujó una tendencia negativa vinculada a una sequía plurianual.

En estudios de interés agropecuario, una tendencia negativa persistente puede indicar una pérdida de resiliencia hídrica a escala regional. Un sistema que varía mucho a través de los años, pero no define una tendencia de largo plazo, mostraría un sistema sensible a las variables climáticas pero estructuralmente estable. En una analogía con el denominado capital natural, los productos de GRACE permiten además evaluar el capital hídrico regional en el mediano y largo plazo. La significancia estadística de una pendiente lineal permite detectar la tendencia de largo plazo del capital hídrico regional.

Los datos de GRACE son rigurosos y robustos a una escala regional amplia. En términos prácticos, la señal hidrológica de GRACE se resuelve típicamente a escalas de  $\approx 300$ – $400$  km de longitud, equivalente a  $\approx 100.000$ – $200.000$  km<sup>2</sup> de superficie (entre 10 y 20 millones de hectáreas). Cada estimación representa un promedio espacial amplio, no un valor puntual. Por lo tanto su valor se relativiza si se pretende explorar escalas de lote o pequeña cuenca hídrica. Esta plataforma no discrimina entre agua en superficie, agua superficial en suelo (ejemplo, a un metro de profundidad), y agua subsuperficial (acuíferos profundos). Para abordar una separación mecánica de los componentes hídricos, es necesario explorar una integración del producto GRACE con datos de GLDAS-Giovanni.

### **Almacenaje de Agua Sub-superficial**

El agua sub-superficial hace referencia a acuíferos subterráneos (libres y confinados) que se localizan por debajo del estrato de humedad superficial (o estrato de agua “colgante”) que genéricamente se denomina como “napa freática” y que en esta investigación referimos (con criterio agronómico) como humedad del suelo en zona radicular.

En Argentina no está disponible un sistema integrado, continuo y homogéneo, a escala nacional, que describa los niveles de los acuíferos sub-superficiales como poseen algunos países. Existen, en cambio, redes fragmentadas de series piezométricas que provienen de organismos nacionales, provinciales y proyectos específicos.

La pregunta pertinente que se hizo para este estudio fue si era posible aislar el agua sub-superficial, o “componente acuífero”, dentro de una serie de datos provistos por GRACE. Sin duda, la señal de acuíferos subsumida dentro de lo que se denomina agua total, incluye el agua sub-superficial (acuíferos), la humedad superficial del suelo, las corrientes y cuerpos de agua en superficie como ríos, arroyos, lagos, lagunas o pantanos, y la nieve (que en general se detecta en zonas andinas y sub-andinas). Desde el punto de vista físico, la señal gravitatoria integra toda la columna de masas que varían a través del tiempo, desde la superficie hasta varios kilómetros de profundidad. Ante el interrogante acerca de si puede GRACE estimar cambios en acuíferos confinados profundos, la respuesta es que los acuíferos confinados suelen tener tiempos de respuesta muy lentos y presentan variaciones pequeñas de masa a través del tiempo. Por lo tanto, la señal de cambio suele ser indistinguible dentro de la variación hídrica total. Son los acuíferos libres (en contacto con la atmósfera) los que mejor puede detectar este sistema.

El método que se suele aplicar para estimar cambios en los niveles de acuíferos subterráneos surge de una combinación de datos de GRACE y de GLDAS-Giovanni.

Algunas publicaciones que abordan esta metodología son las siguientes: (<https://www.earthdata.nasa.gov/es/learn/trainings/el-monitoreo-de-aguassubterraneas-usando-observaciones-de-las-misiones-gravity> ;

<https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1532>;

<https://www.mhwm.pl/Evaluation-of-Water-Storage-Changes-in-Southeastern-Anatolia-Turkey-using-GRACEand,149849,0,2.html>;

[https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/202011/wrmpart4\\_bspanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/202011/wrmpart4_bspanish.pdf));

El enfoque estándar para aislar la señal de agua subterránea consiste en restar los componentes de agua superficial (humedad del suelo, nieve, agua superficial) del almacenamiento total de agua obtenido por GRACE:

$$\Delta GWS = \Delta TWS\{GRACE\} - (\Delta SMS\{GLDAS\} + \Delta SWE\{GLDAS\}), \text{ donde}$$

$\Delta GWS$ : Cambio en el almacenamiento de agua subterránea.

$\Delta TWS\{GRACE\}$ : Cambio en el almacenamiento total de agua (datos de anomalía de masa según GRACE)

$\Delta SMS\{GLDAS\}$ : Cambio en la humedad del suelo (almacenaje de agua superficial en el suelo) según GLDAS-Giovanni.

$\Delta SWE\{GLDAS\}$ : Cambio en el equivalente-agua de la nieve (Snow Water Equivalent), solo si aplica en la región andina y sub-andina (por ejemplo, Cuyo o Patagonia).

En general, GRACE resulta muy útil para estimar la señal subterránea de los acuíferos en la llanura pampeana, la cuenca del río Paraná y la región chaqueña debido a su topografía plana (hay una señal más limpia), ausencia de nieve y a un gran componente freático. Cuando se dan estas condiciones, GRACE captura muy bien los ciclos húmedos y secos, las recargas y extracciones regionales y los eventos extremos como las sequías. Las estimaciones no son tan precisas en regiones montañosas donde hay hielo y nieve, donde hay grandes flujos de agua superficial (ríos) o donde existen acuíferos pequeños o de índole muy local. También es necesario tener en cuenta, como se ha mencionado, que GRACE tiene una resolución espacial muy extensa.

Es esencial considerar un aspecto clave a la hora de detectar cambios la señal de agua en acuíferos. Por ejemplo, en general se considera que GLDAS tiende a subestimar el almacenamiento de agua en zonas áridas. Para conferir solidez a la interpretación, los expertos sugieren acompañar los datos de discriminación calculados por un análisis de incertidumbre. Un método simple para estimar la incertidumbre es recurrir a tendencia temporal del acuífero ajustada mediante regresión lineal y luego estimar el error estándar de la pendiente. En este estudio, el análisis de incertidumbre se abordó mediante una relación simple entre el error estándar de la pendiente y la media de los datos evaluados. Se asumió que cuando esa relación es baja, la incertidumbre de la señal estimada también lo es, y viceversa. En necesario asimismo señalar que existen métodos estadísticos más sofisticados y precisos para realizar un análisis de incertidumbre.