

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MONITOREO OPERACIONAL DE LAS ANOMALÍAS DE HUMEDAD DE SUELO PARA  
CHILE CONTINENTAL**

**ROCÍO MUÑOZ-NEIRA<sup>1 2 3</sup>**  
**MAURICIO ZAMBRANO-BIGIARINI<sup>4 5 6</sup>**

**RESUMEN**

La humedad del suelo (HS), en sus capas superficial (SSM; 0-10 cm) y radicular (RZSM; 0-100 cm), es un componente esencial dentro del ciclo hidrológico. En Chile, donde existe un marcado gradiente climático latitudinal, su monitoreo continuo es fundamental. Este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma web operativa para el seguimiento casi en tiempo real de la HS y sus anomalías en Chile continental.

Se seleccionaron productos grillados operacionales (ERA5, ERA5-Land, GLDAS-Noah y SMAP-L4), para analizar valores volumétricos de HS y sus anomalías. Se implementó un sistema automatizado de descarga diaria y procesamiento de datos en el servidor <https://kutama.ufro.cl/>. Las anomalías se evaluaron mediante dos índices estandarizados: el SSMI, basado en una distribución gamma, y el ESSMI, calculado mediante estimación de densidad Kernel (KDE). Ambos permiten análisis en escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24 meses. Se abordaron dos casos de estudio: (i) un evento de precipitación intensa en la cuenca del Río Claro (Maule, agosto de 2023), que acumuló 791,35 mm y evidenció un incremento notable de HS, especialmente en la zona de raíces; y (ii) la cuenca del Río Petorca (Longotoma), afectada por sequía prolongada desde 2010, donde ambos índices reflejaron anomalías negativas persistentes.

La plataforma “Pülliko” (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>) se establece como una herramienta innovadora y actualizada para el monitoreo operacional de HS en Chile, superando las limitaciones de los sistemas existentes y apoyando la gestión hídrica, agrícola y ambiental.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad de La Frontera

<sup>2</sup> Estudiante Tesista, Observatorio de Recursos Hídricos de La Araucanía (Kimün-Ko), Universidad de La Frontera

<sup>3</sup> Estudiante Tesista, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile

<sup>4</sup> Profesor Asociado, Departamento de Obras Civiles, Universidad de La Frontera

<sup>5</sup> Director, Observatorio de Recursos Hídricos de La Araucanía (Kimün-Ko), Universidad de La Frontera

<sup>6</sup> Investigador Asociado, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), Universidad de Chile

## 1. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo es un componente esencial del ciclo hidrológico, ya que permite la interacción entre la atmósfera, el suelo y la vegetación, regulando los procesos hidrológicos, ecológicos y meteorológicos. Además, la distribución espacio-temporal de la humedad del suelo resulta clave en la dinámica de intercambio de masa y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera (Islam and Engman, 1996; Brocca et al., 2009; Han et al., 2021). En este sentido, la medición de humedad del suelo a distintas escalas temporales y profundidades (Teuling et al., 2006; Núñez Ibarra, 2024) se vuelve fundamental para comprender fenómenos extremos. En Chile, estos fenómenos no han sido ajenos, destacando la sequía prolongada que afecta a la zona centro-sur del país desde el año 2010, así como eventos de inundación en la misma región (Contreras and Escauriaza, 2020).

Se ha observado que las anomalías en la humedad del suelo pueden influir en los patrones de precipitación, lo cual ha sido respaldado tanto por datos recopilados (e.g., Bolin, 1959; Ruiz-Barradas and Nigam, 2006; Dirmeyer et al., 2006) como por modelos numéricos (e.g., Guo et al., 2006; Kim and Hong, 2007; Koster et al., 2006; Seneviratne et al., 2006; Zhang et al., 2008; Jaeger and Seneviratne, 2011).

En el otro extremo, la **sequía de humedad del suelo** (o también llamada sequía agrícola) es un período sostenido y espacialmente extenso en el que la disponibilidad de agua en el suelo (principalmente en la zona de raíces) se encuentra por debajo de sus niveles promedio (Europea, 2007; Van Loon, 2015; Tallaksen and Van Lanen, 2023).

Para el monitoreo y la evaluación de la sequía de humedad del suelo se utilizan índices de sequía, los cuales proporcionan una medida de las condiciones de humedad actuales respecto a un período de referencia, capturando eficazmente las variaciones espacio-temporales de la humedad del suelo (Palagiri and Pal, 2024). Entre los más tradicionales se encuentran: Palmer Drought Severity Index (PDSI; Palmer, 1965), Crop Moisture Index (CMI; Palmer, 1968), Soil Moisture Deficit Index (SMDI; Narasimhan and Srinivasan, 2005), Soil Moisture Index (SMI; Sridhar et al., 2008), Standardized Soil Moisture Index (SSMI; Sheffield et al., 2004), Empirical Standardized Soil Moisture Index (ESSMI; Sheffield et al., 2004) y Soil Water Deficit Index (SWDI; Martínez-Fernández et al., 2015). Además, Svoboda et al. (2012) explican que el Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993) puede utilizarse para monitorear las condiciones de sequía de humedad del suelo para escalas temporales de 3, 6 y 12 meses (Ariyanto et al., 2020).

El monitoreo de las condiciones de humedad del suelo en Chile es relativamente reciente, siendo abordado solo a partir de 2022. La Dirección Meteorológica de Chile posee un monitor de sequía mensual que involucra distintos índices (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/requerimiento/producto/RE1029>), la Pontificia Universidad Católica de Chile también cuenta con una plataforma de monitoreo de sequía (<https://iniciativasequia.uc.cl>) y el Observatorio de Sequía para la Agricultura y la Biodiversidad de Chile de la Universidad Mayor, a través de su plataforma “ODES-Unidades” (<https://odes-chile.org/app/unidades>).

A partir de lo anterior, es posible concluir que actualmente no existe en Chile una plataforma de monitoreo que entregue información de humedad del suelo en tiempo real, dado que las plataformas disponibles presentan - en el mejor de los casos - una actualización mensual. Además, estas herramientas no proporcionan datos volumétricos de humedad del suelo derivados de múltiples fuentes (sistemas de asimilación y distintos modelos hidrológicos), ni tampoco ofrecen índices diarios para evaluar las anomalías de humedad del suelo. Debido a las falencias de estas plataformas es que, en este trabajo, se propone desarrollar un prototipo de plataforma web que permita el monitoreo en tiempo (casi) real de humedad del suelo y sus anomalías para Chile continental. Además, se analizarán valores volumétricos de humedad de

suelo y sus anomalías en dos casos de estudio, uno relacionado a evento de precipitaciones intensas y el otro representativo de un evento de sequía.

## 2. ÁREA DE ESTUDIO

Chile continental (17.5°- 56°S; 76°- 66°O), su extensa longitud territorial y su diversidad topográfica dan lugar a una gran variabilidad climática. Según Beck et al. (2023) se han identificado 13 tipos de climas en el territorio continental chileno, para el período 1991-2020 con resolución de 0,1°. Esta diversidad geográfica también se refleja en la cobertura de suelo, desde desiertos áridos en el norte, valles agrícolas en la zona central, hasta bosques templados en el sur, y determina diferencias significativas en los patrones de precipitación y disponibilidad hídrica (Donoso Zegers et al., 1993; Vicuña et al., 2021).

A continuación, se resumen algunos antecedentes importantes sobre clima y precipitaciones en las tres zonas de Chile continental.

- Zona norte: Incluye las regiones de Arica y Parinacota hasta Coquimbo (17°-30°S). Predomina un clima árido y desértico, con precipitaciones anuales inferiores a 50 [mm] en el Desierto de Atacama, considerado uno de los lugares más secos del mundo (Houston and Hartley, 2003). Las precipitaciones se concentran principalmente en eventos extremos asociados al invierno altiplánico (Garreaud et al., 2003).
- Zona centro: Desde Valparaíso hasta el Biobío (30°-38°S), se presenta un clima mediterráneo, con estaciones bien marcadas y precipitaciones anuales que varían entre 300 y 800 [mm], concentradas en invierno (Montecinos and Aceituno, 2003). Esta región es especialmente sensible a eventos de sequía, como la megasequía iniciada en 2010, la cual redujo de manera importante la disponibilidad hídrica (Garreaud et al., 2017).
- Zona sur: Desde La Araucanía hasta la Región de Los Lagos (38°-44°S), el clima es templado lluvioso, con precipitaciones anuales que superan los 2000 [mm] en algunas zonas cordilleranas (Viale and Garreaud, 2015). Más al sur, en la Patagonia, se presenta un clima frío con alta humedad y precipitaciones predominantemente nivales (Masiokas et al., 2020).

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 PRODUCTOS GRILLADOS DE HUMEDAD DE SUELO

El monitor de valores volumétricos de humedad de suelo y sus anomalías se desarrolló a partir de la implementación de datos diarios de humedad de suelo, obtenidos desde diversas fuentes que permiten representar condiciones históricas y actuales (latencia de actualización ~5 días) de manera consistente.

Se utilizó productos grillados con asimilación de datos, el primero ERA5, re-análisis atmosférico global de quinta generación producido por el ECMWF (Hersbach et al., 2020), que posee una resolución de grilla de 0,25°, aproximado 25 [km] en el Ecuador que dispone de datos horarios disponibles desde 1940 hasta el presente, con actualizaciones diarias disponibles con 5 días de latencia. En el caso del contenido volumétrico de agua en el suelo, el producto discretiza la columna de suelo en cuatro capas de suelo: 0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 [cm] en unidades de [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] a nivel global. El sitio para la descarga de los datos del producto es: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>.

Y el segundo producto con asimilación de datos, es SMAP-L4 (Reichle et al., 2021) que proviene de la misión satelital SMAP (O'Neill et al., 2010) de la NASA. SMAP-L4 proporciona estimaciones globales, cada 3 horas, con una resolución espacial de 9 [km] para la zona superficial (SSM; 0-5 [cm]) y zona de

raíces (RZSM; 0-100 [cm]) en unidades de  $[m^3/m^3]$  a nivel global, con una latencia media de 2.5 días desde marzo de 2015 hasta la actualidad. El sitio para descarga de los datos es: <https://nsidc.org/data/data-access-tool/SPL4SMAU/versions/8>.

Adicionalmente, se incorporaron datos de humedad de suelo del reanálisis ERA5-Land y su extensión en tiempo casi-real ERA5-Land-NRT, desarrollados por el ECMWF, que entregan información horaria con resolución espacial cercana a 9 km (Muñoz-Sabater et al., 2021). ERA5-Land es entregado en una resolución temporal horaria desde 1950 hasta la actualidad y con una latencia de actualización mínima de datos de 5 días. La columna de suelo de ERA5-Land se discretiza en las mismas cuatro capas de suelo que ERA5: 0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 [cm] en unidades de  $[m^3/m^3]$  a nivel global. El sitio para la descarga de los datos es: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=download#manage-licences>.

Finalmente, GLDAS-Noah (Rodell et al., 2004) versión 2.1, no contempla la asimilación de datos, y utiliza una combinación de datos de modelos y observaciones desde el año 2000 hasta la actualidad. La resolución temporal del producto es tri-horaria, con una resolución espacial de  $0,25^\circ$ . Además, considera cuatro capas de suelo; 0-10, 10-40, 40-100 y 100-200 [cm] en unidades de  $[kg/m^2]$  a nivel global, la conversión de unidades se adopta de Xing et al. (2021).

### 3.2 ÍNDICES ESTANDARIZADOS DE HUMEDAD DE SUELO

El monitoreo de la humedad del suelo es fundamental para evaluar la disponibilidad hídrica, la detección de sequías y el manejo de recursos agrícolas e hídricos. En este trabajo, se han seleccionado dos índices estandarizados de humedad del suelo basados en datos observados:

- Índice Paramétrico (SSMI - Standardized Soil Moisture Index): Se basa en la distribución “gamma” para modelar la humedad del suelo y transformar los valores de contenido volumétrico de agua en el suelo en anomalías estandarizadas (Palagiri and Pal, 2024).
- Índice No Paramétrico (ESSMI - Empirical Standardized Soil Moisture Index): Se calcula mediante el estimador de Kendall Gaussiano, lo que lo hace robusto ante distribuciones no normales (Carrão et al., 2016).

Ambos índices fueron seleccionados ya que responden a consideraciones metodológicas, operativas y de aplicabilidad directa sobre datos grillados disponibles para Chile continental. En este trabajo, los datos provienen de productos grillados (ERA5, ERA5Land y GLDAS-Noah).

Los índices estandarizados de humedad de suelo dependen de datos y parámetro calculados en el rango histórico (1981-2024), los que están almacenados en el servidor <https://kutama.ufro.cl/>. SSMI y ESSMI están disponibles en la zona superficial (0-10 [cm]) y zona de raíces (0-100 [cm]) de humedad de suelo para cada set de datos disponibles (ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah).

El producto grillado de SMAP-L4 solo es utilizado para visualizar los valores volumétricos de humedad de suelo, ya que el período de datos disponible es menor a 12 años, por lo que no se puede considerar para el cálculo de índices estandarizados.

### 3.4 PLATAFORMA WEB: PÜLLIKO

En la actualidad, Chile continental no cuenta con herramientas que permitan el monitoreo en tiempo real o casi en tiempo real de la humedad del suelo. Con el fin de solucionar este problema, en este trabajo se creó y construyó una plataforma web interactiva, llamada Pülliko (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>), empleando el lenguaje de programación R (R Core Team, 2025), utilizando principalmente el paquete Shiny (Chang et al., 2015).

La plataforma web ha sido creada como un recurso interactivo para la consulta y visualización de SpatRaster y series temporales del comportamiento actual e histórico de la humedad del suelo, tanto en valores volumétricos como a través de índices estandarizados diarios (SSMI y ESSMI), para escalas temporales de 1, 3, 6, 12 y 24. Su diseño integra dos procesos distintos pero que se complementan entre sí: en primer lugar, la automatización del proceso de descarga y almacenamiento de datos grillados desde servidores externos. Por otro lado, la aplicación Shiny se conecta a esos archivos que han sido preprocesados y que están almacenados en el servidor <https://kutama.ufro.cl/>, descargando solo aquellos necesarios para responder a la consulta definida por el usuario.

La plataforma Pülliko (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>), permite visualizar mapas de valores volumétricos de humedad del suelo para dos profundidades: la de SSM (0-10 [cm]) y la de RZSM (0-100 [cm]). También es posible visualizar los índices de humedad del suelo, el SSMI y ESSMI, los descritos en la Sección 3.2. Estos índices pueden ser visualizados tanto para la SSM como para la RZSM. Estas opciones de visualización están representadas en la Figura 1.

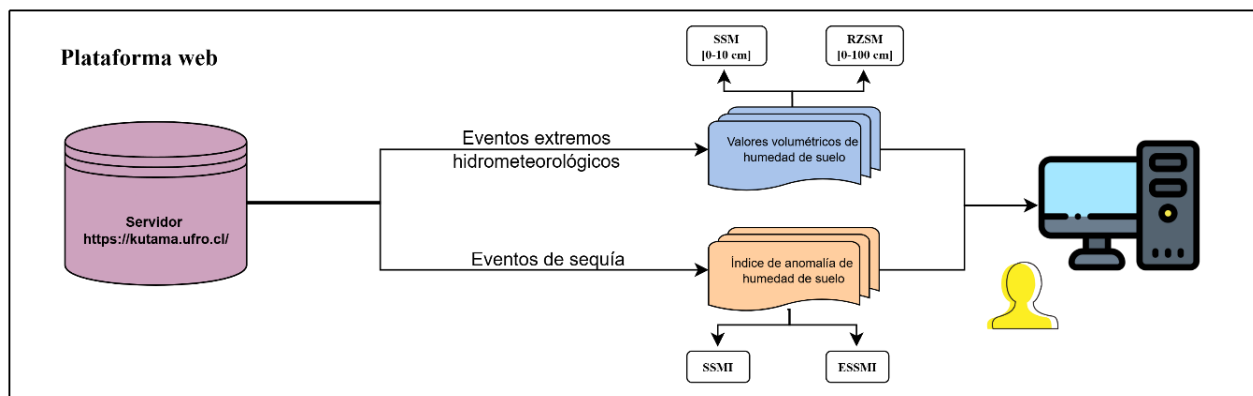


Figura 1: Opciones de consulta en la plataforma web.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 CASOS DE ESTUDIO

Para demostrar la aplicación práctica de la plataforma web creada, en esta sección se describen dos casos de estudio: i) evento extremo hidrometeorológico y ii) evento de sequía. En el caso i) se evaluó un evento de precipitación intensa ocurrida en agosto de 2023 en la Cuenca de Río Claro en San Carlos, en la región del Maule. Y en el caso ii), la cuenca del Río Petorca, en la localidad de Longotoma, una zona altamente afectada por sequías prolongadas iniciadas en 2010. Las series temporales, propiedades de suelo y otras variables consideradas fueron a partir de un promedio de todas las celdas dentro de la cuenca de estudio.

#### 4.1.1 RESPUESTA DE LA HUMEDAD DEL SUELO EN UN EVENTO DE PRECIPITACIÓN INTENSO

Para evaluar la importancia que tienen los valores volumétricos de humedad del suelo para monitorear los efectos de eventos de precipitación intensos, se analizó el caso del sistema frontal que afectó a la Cuenca de Río Claro en San Carlos entre el 18 y el 23 de agosto de 2023. Según registros de <https://vismet.cr2.cl/>, el evento alcanzó una precipitación acumulada de 791,35 [mm] en 5 días.

La Figura 2 muestra la evolución diaria del contenido volumétrico de agua en el suelo según los productos GLDAS-Noah, ERA5, ERA5-Land y SMAP-L4 junto con la precipitación diaria acumulada obtenida de

ERA5. También se muestran en líneas horizontales las propiedades de suelo extraídas del producto CLSoilMaps (Dinamarca et al., 2023), específicamente la capacidad de campo (FC) y el punto de saturación del suelo ( $\theta_s$ ) en la cuenca.

Durante el evento, la precipitación acumulada que registró ERA5 alcanzó cerca de 621 [mm] (diferente a lo registrado por vismet), lo cual generó un aumento evidente en los valores de humedad del suelo en la capa superficial para los tres productos analizados. Este aumento situó los niveles de humedad por sobre la capacidad de campo (FC = 0,314 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]), pero aún por debajo del punto de saturación ( $\theta_s$  = 0,488 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]), lo que indica una recarga en la zona superficial sin alcanzar condiciones de saturación.

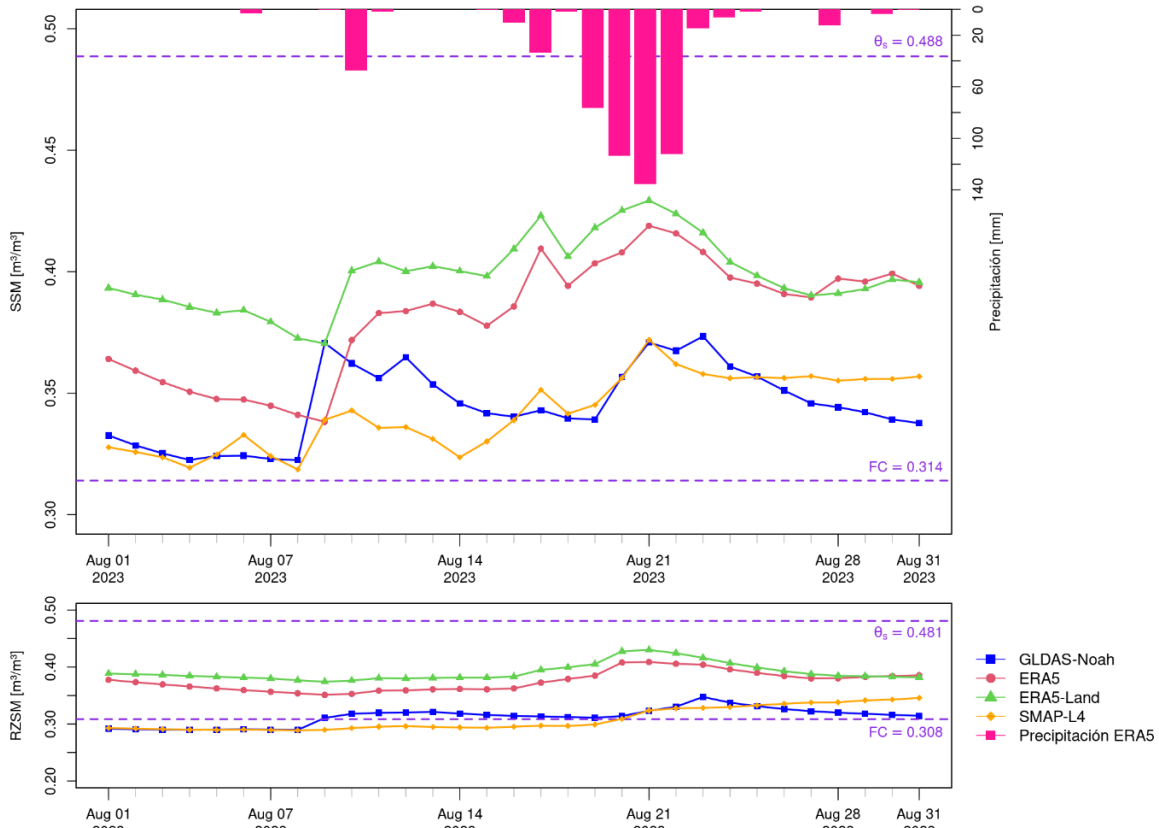


Figura 2: Precipitación (ERA5) vs SSM y RZSM para evento de agosto 2023 en la cuenca de Río Claro en San Carlos.

#### 4.1.2 MONITOREO DE LAS ANOMALÍAS DE HUMEDAD DEL SUELO ANTE EVENTOS DE SEQUÍA

En la Figura 3 se muestra el valor del índice SSMI calculado el día 01 de cada mes, a distintas escalas temporales, para la RZSM. Se muestra una dinámica de anomalías para el período de 2010-2023.

En la Figura 3, a escala mensual (SSMI-1), se observa una alta respuesta a la variabilidad diaria, con oscilaciones frecuentes entre anomalías negativas y positivas. Esta escala permite capturar de manera inmediata la respuesta del suelo a eventos intensos, aunque presenta también mayores discrepancias entre productos. Por ejemplo, en eventos como enero 2011, mayo 2012 o mayo 2021, GLDAS-Noah registra anomalías negativas, mientras que los productos ECMWF reflejan anomalías positivas, y viceversa.

La Figura 3 muestra que, en la SSM, desde 2019 en adelante, se observa una señal persistente de anomalía negativa en las escalas más largas (SSMI-6, SSMI-12 y SSMI-24), reflejando condiciones de sequía prolongada.

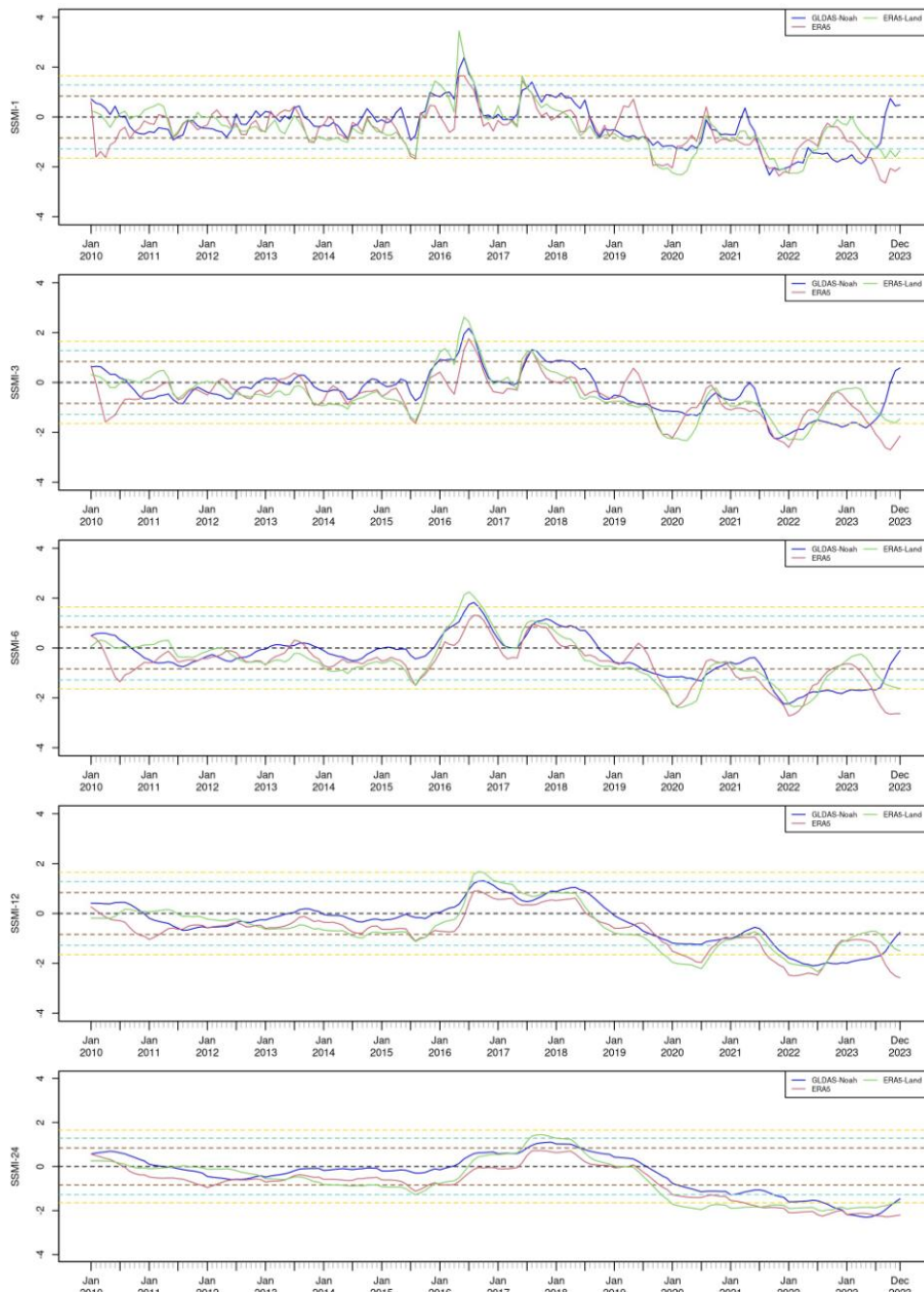


Figura 3: SSMI en RZSM para el día 1 del mes a distintas escalas temporales para el período 2010-2023.

## 4.2 PLATAFORMA WEB: PÜLLIKO

La plataforma Pülliko (<https://hzambran.shinyapps.io/Pulliko/>) desarrollada permite consultar y visualizar de forma interactiva los valores volumétricos de humedad del suelo y los índices estandarizados de

anomalías (SSMI y ESSMI), para distintas escalas temporales. La Figura 4 muestra una interfaz adaptada de la plataforma <https://mawunnrt.cr2.cl/>.

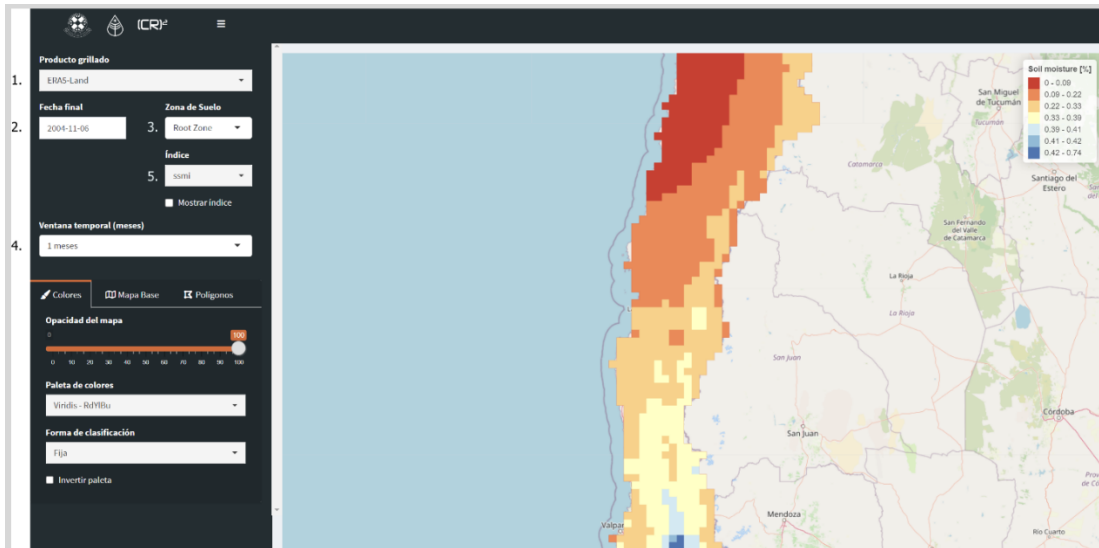


Figura 4: Interfaz plataforma web. Se visualizan los valores volumétricos de RZSM para Chile continental con producto grillado de ERA5-Land para el día 06/11/2024 con escala temporal de 1 mes.

El usuario debe seleccionar el producto grillado de humedad del suelo (1. Producto grillado), que puede corresponder a ERA5, ERA5-Land, GLDAS-Noah y SMAP-L4, de acuerdo con lo descrito en la Sección 3.1. En el caso de visualizar los índices estandarizados, solo están disponibles ERA5, ERA5-Land y GLDAS-Noah. Posteriormente, es necesario indicar la fecha (final) para la cual se desea visualizar el valor de humedad de suelo o del índice estandarizado (2. Fecha final). Así como también definir la zona de almacenamiento en el perfil de suelo (3. Zona de suelo). Adicionalmente, se debe seleccionar la escala temporal de agregación de los datos (4. Ventana temporal), disponible en períodos de 1, 3, 6, 12 o 24 meses, para el caso de la consulta de los índices SSMI y ESSMI. En caso de querer visualizar directamente un índice estandarizado, la plataforma permite elegir entre SSMI o ESSMI mediante la opción 5. Índice, debiendo activar adicionalmente la casilla "Mostrar índice".

## 5. CONCLUSIONES

El presente trabajo desarrolló una plataforma web operativa para el monitoreo en tiempo casi real de la humedad del suelo (HS) y sus anomalías en Chile continental, integrando productos grillados de alta resolución como ERA5, ERA5-Land, GLDAS-Noah y SMAP-L4. Esta plataforma, denominada “Pülliko”, representa un avance significativo frente a los sistemas existentes en el país, al ofrecer datos diarios y visualización interactiva tanto de valores volumétricos de HS como de índices estandarizados.

Los resultados evidencian el gradiente climático latitudinal de Chile, con mayores valores de HS en la zona sur y menores en el norte, así como diferencias notables entre los productos evaluados. En particular, ERA5 y ERA5-Land reportaron valores más altos de HS en comparación con GLDAS-Noah y SMAP-L4, lo que sugiere la necesidad de un análisis comparativo detallado para definir el producto más adecuado en función del objetivo específico.

La estimación de anomalías mediante los índices **SSMI** (paramétrico, basado en distribución gamma) y **ESSMI** (no paramétrico, calculado mediante estimación de densidad Kernel) permitió identificar condiciones de sequía y exceso hídrico. El SSMI destaca por su capacidad para detectar eventos extremos

inmediatos, mientras que el ESSMI ofrece resultados más estables y menos afectados por valores atípicos recientes.

La aplicación de la plataforma en dos casos de estudio (un evento de precipitación intensa en la cuenca del Río Claro y la sequía prolongada en la cuenca del Río Petorca) validó la utilidad del sistema para el análisis operativo de HS. En conjunto, este trabajo contribuye al fortalecimiento de las capacidades de monitoreo hidrológico y a la gestión de recursos hídricos y agrícolas en escenarios de cambio climático.

## AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del presente trabajo fue posible gracias al acceso y utilización de datos provenientes de los productos grillados proporcionados por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF; productos ERA5 y ERA5-Land) y por la National Aeronautics and Space Administration (NASA; productos GLDAS-Noah y SMAP-L4). Asimismo, se agradece el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través de los proyectos:

- ANID PCI NSFC190018: "Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach".
- ANID Fondecyt Regular 1212071: "The catchment's memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate".

## REFERENCIAS

Ariyanto, D.P., Aziz, A., Komariah, K., Sumani, S., Abara, M., 2020. Comparing the accuracy of estimating soil moisture using the standardized precipitation index (spi) and the standardized precipitation evapotranspiration index (spei). *SAINS TANAH Journal of Soil Science and Agroclimatology* 17, 23–29.

Beck, H.E., McVicar, T.R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N.J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A.I., Miralles, D.G., 2023. High-resolution (1 km) köppen-geiger maps for 1901–2099 based on constrained cmip6 projections. *Scientific data* 10, 724.

Bolin, B., 1959. atmosphere and the sea in motion: scientific contributions to the rossby memorial volume.

Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Morbidelli, R., 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas in central italy. *Geoderma* 148, 364–374.

Carrão, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G., Barbosa, P., 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 48, 74–84.

Chang, W., Cheng, J., Allaire, J., Xie, Y., McPherson, J., 2015. Package 'shiny'. See <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download>.

Contreras, M.T., Escauriaza, C., 2020. Modeling the effects of sediment concentration on the propagation of flash floods in an andean watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20, 221–241.

Dirmeyer, P.A., Koster, R.D., Guo, Z., 2006. Do global models properly represent the feedback between land and atmosphere? *Journal of Hydrometeorology* 7, 1177–1198.

Donoso Zegers, C., et al., 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica. *ecología forestal*.

Europea, C., 2007. Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council, COM (2007) 414.

Garreaud, R.D., Vuille, M., Clement, A.C., 2003. The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 5–22.

Garreaud, R.D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J.P., Christie, D., Galle Guillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., Zambrano-Bigiarini, M., 2017. The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Journal of Hydrology* 21, 6307–6327.

Guo, Z., Dirmeyer, P.A., Koster, R.D., Sud, Y., Bonan, G., Oleson, K.W., Chan, E., Versegny, D., Cox, P., Gordon, C., et al., 2006. Glace: the global land–atmosphere coupling experiment. Part II: Analysis. *Journal of Hydrometeorology* 7, 611–625.

Han, H., Choi, C., Kim, J., Morrison, R.R., Jung, J., Kim, H.S., 2021. Multiple-depth soil moisture estimates using artificial neural network and long short-term memory models. *Journal of Hydrology* 13, 2584.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Ni Colas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999–2049. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.3803>.

Houston, J., Hartley, A.J., 2003. The central Andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology* 23, 1453–1464.

Islam, S., Engman, T., 1996. Why bother for 0.0001% of Earth's water? Challenges for soil moisture research. *Journal of Hydrology* 77, 420–420.

Jaeger, E.B., Seneviratne, S.I., 2011. Impact of soil moisture–atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dynamics* 36, 1919–1939.

Kim, J.E., Hong, S.Y., 2007. Impact of soil moisture anomalies on summer rainfall over East Asia: A regional climate model study. *Journal of Climate* 20, 5732–5743.

Koster, R.D., Sud, Y., Guo, Z., Dirmeyer, P.A., Bonan, G., Oleson, K.W., Chan, E., Versegny, D., Cox, P., Davies, H., et al., 2006. Glace: the global land–atmosphere coupling experiment. Part I: Overview. *Journal of Hydrometeorology* 7, 590–610.

Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., 2015. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology* 522, 265–273.

Masiokas, M.H., Villalba, R., Christie, D.A., Betman, E., Luckman, B.H., LeQuesne, C., Prieto, M.d.C., Mauder, S., 2020. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Hydrometeorology* 7, 966–984.

McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., et al., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Boston. pp. 179–183.

Montecinos, A., Aceituno, P., 2003. Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical south america based on tropical pacific sst.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., et al., 2021. Era5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data* 13, 4349–4383.

Narasimhan, B., Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring 133, 69–88.

Núñez Ibarra, D.A., 2024. Evaluación de la humedad de suelo estimada mediante productos grillados en la zona centro-sur de chile.

O'Neill, P., Entekhabi, D., Njoku, E., Kellogg, K., 2010. The nasa soil moisture active passive (smap) mission: Overview, in: *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 3236–3239.

Palagiri, H., Pal, M., 2024. Parametric and non-parametric indices for agricultural drought assessment using esacci soil moisture data over the southern plateau and hills, india. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 134, 104175.

Palmer, W.C., 1965. *Meteorological drought*. us.

Palmer, W.C., 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index.

R Core Team, 2025. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

Reichle, R.H., Liu, Q., Ardizzone, J.V., Crow, W.T., De Lannoy, G.J., Dong, J., Kimball, J.S., Koster, R.D., 2021. The contributions of gauge-based precipitation and smap brightness temperature observations to the skill of the smap level-4 soil moisture product. *Journal of Hydrometeorology* 22, 405–424.

Rodell, M., Houser, P., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., et al., 2004. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society* 85, 381–394.

Ruiz-Barradas, A., Nigam, S., 2006. Great plains hydroclimate variability: The view from north american regional reanalysis. *Journal of climate* 19, 3004–3010.

Seneviratne, S.I., Lüthi, D., Litschi, M., Schär, C., 2006. Land–atmosphere coupling and climate change in europe. *Nature* 443, 205–209.

Sheffield, J., Goteti, G., Wen, F., Wood, E.F., 2004. A simulated soil moisture based drought analysis for the united states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109.

Sridhar, V., Hubbard, K.G., You, J., Hunt, E.D., 2008. Development of the soil moisture index to quantify agricultural drought and its “user friendliness” in severity-area duration assessment. *Journal of Hydrometeorology* 9, 660–676.

Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D., 2012. Standardized precipitation index: user guide.

Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A., 2023. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater.

Teuling, A.J., Uijlenhoet, R., Hupet, F., Van Loon, E., Troch, P., 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 10, 755–767.

Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2, 359–392.

Viale, M., Garreaud, R.D., 2015. Orographic effects of the subtropical and extratropical andes on upstream precipitation and moisture transport. *Journal of Hydrometeorology* 16, 778–791.

Vicuña, S., Vargas, X., Boisier, J.P., Mendoza, P.A., Gómez, T., Vásquez, N., Cepeda, J., 2021. *Impact of Climate Change on Water Resources in Chile*. Springer International Publishing, Cham. pp. 347–363.

Xing, Z., Fan, L., Zhao, L., De Lannoy, G., Frappart, F., Peng, J., Li, X., Zeng, J., Al-Yaari, A., Yang, K., et al., 2021. A first assessment of satellite and reanalysis estimates of surface and root-zone soil moisture over the permafrost region of qinghai-tibet plateau. *Remote Sensing of Environment* 265, 112666.

Zhang, J., Wang, W.C., Leung, L.R., 2008. Contribution of land-atmosphere coupling to summer climate variability over the contiguous united states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 113.