



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DE SUELO ESTIMADA MEDIANTE  
PRODUCTOS GRILLADOS EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE**

Actividad Formativa Equivalente para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en  
Gestión Territorial de Recursos Naturales

**DANIEL ALEJANDRO NÚÑEZ IBARRA**

Directores de AFE

Dr. Mauricio Galleguillos Torres

Dr. Mauricio Zambrano-Bigiarini

Profesores consejeros

Dr. Luis Morales Salinas

Dr. Gerardo Soto Mundaca

Evaluadora externa

Dra. Camila Álvarez-Garretón

SANTIAGO – CHILE

2024

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS ESCUELA**  
**DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DE SUELO ESTIMADA MEDIANTE**  
**PRODUCTOS GRILLADOS EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE**

AFE presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en Gestión Territorial  
de Recursos Naturales

**DANIEL ALEJANDRO NÚÑEZ IBARRA**

	Calificaciones
<b>DIRECTORES DE AFE</b>	
Mauricio Galleguillos Torres Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	7,0
Mauricio Zambrano-Bigiarini Ingeniero Civil, Ph.D.	7,0
<b>PROFESORES/AS CONSEJEROS</b>	
Luis Morales Profesor de Física y Ciencias Naturales, MS, Ph.D.	6,7
Gerardo Soto Ingeniero Forestal, MS, Ph.D.	6,8



Santiago, Chile  
2024

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Agradezco a la Fundación *Data Observatory* (DO), Proyecto ANID N°DO210001, por brindar el apoyo tecnológico y económico necesario para desarrollar el presente trabajo.

Al Proyecto ANID PCI NSFC 190018: “*Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach*”.

Al Proyecto Fondecyt 1212071: “*The catchment’s memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate*”.

Al Proyecto Fondecyt 1210932: “*Improving forest water yield and productivity quantification at the catchment scale by mapping root depth and eco-physiological thresholds with remote sensing and water transfer modeling*”.

De igual manera quiero agradecer profundamente a mis profesores guía Mauricio Galleguillos y Mauricio Zambrano, los cuales siempre estuvieron dispuestos a brindarme su apoyo, conocimiento y tiempo. Gran parte de este trabajo es fruto de sus consejos y apoyo hacia mi persona.

A mi madre Claudia y a mi padre Carlos, por siempre confiar, creer, incentivar y entregarme todo lo necesario para estudiar por sobre todas las cosas.

A mis grandes amigos de la universidad. A mi polola Monserrat que ha estado acompañándome y apoyándome en todo este proceso.

En síntesis, a toda las personas que me han acompañado en este proceso, este trabajo va en dedicación de ustedes.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
2.1. Objetivo general .....	5
2.2. Objetivos específicos: .....	5
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>6</b>
3.1. Área de Estudio .....	6
3.1.1. Estaciones de monitoreo de humedad de suelo.....	6
3.2. Materiales .....	8
3.2.1. Datos <i>in situ</i> de humedad de suelo .....	8
3.2.2. Datos grillados de humedad de suelo .....	9
3.2.3. Datos auxiliares .....	10
3.2.4. Hardware .....	11
3.3 Métodos.....	11
3.3.1. Evaluar el desempeño de productos grillados de humedad de suelo contra datos <i>in situ</i> .....	12
3.3.2.1 Descarga de datos grillados.....	12
3.3.2.2 Series temporales de humedad del suelo.....	13
3.3.2.2.1 Humedad del suelo superficial (SSM) .....	13
3.3.2.2.2 Creación de HS equivalente para 0-100 cm (RZSM) .....	14
3.3.2.3 Implementación de reducción de escala (Downscaling).....	14
3.3.2.4 Evaluación temporal de los datos grillados de humedad de suelo .....	15
3.3.2.5 Análisis estadístico.....	15
3.3.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo.....	16
3.3.3. Respuesta de la humedad del suelo ante diferentes eventos de precipitación....	16
3.3.4. Propiedades de retención de agua en el suelo .....	18
3.3.5. Programas y paquetes informáticos .....	19
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>20</b>
4.1. Evaluación de productos grillados de humedad de suelo .....	20
4.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo .....	24
4.3. Respuesta de la humedad del suelo a diferentes eventos de precipitación .....	26
4.4. Propiedades de retención de agua en el suelo .....	32
<b>5. DISCUSIÓN</b> .....	<b>36</b>
5.1. Evaluación de productos grillados de humedad de suelo .....	36
5.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo.....	38
5.3. Respuesta de la humedad del suelo a diferentes eventos de precipitación .....	39

5.4. Propiedades de retención de agua en el suelo .....	40
5.5. Perspectivas futuras productos grillados de humedad del suelo .....	41
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>7. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>43</b>
<b>8. APÉNDICES.....</b>	<b>51</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>97</b>
<b>10. FUENTES DE FINANCIAMIENTO .....</b>	<b>99</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Características de sondas en terreno .....	8
<b>Cuadro 2.</b> Productos grillados de humedad de suelo .....	10
<b>Cuadro 3.</b> Productos auxiliares utilizados.....	11
<b>Cuadro 4.</b> Métricas estadísticas .....	16
<b>Cuadro 5.</b> Descripción firmas de HS por eventos de tormenta utilizadas. ....	17
<b>Cuadro 6.</b> Descripción firmas de HS por temporada y serie temporal completa.....	19
<b>Cuadro 7.</b> Promedio métricas de bondad de ajuste. Escala Horaria .....	21
<b>Cuadro 8.</b> Promedio métricas de bondad de ajuste. Escala Diaria .....	23

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> A. Elevación B. Clima C. Cobertura. ....	6
<b>Figura 2.</b> De izquierda a derecha, sitios de monitoreo de HS: matorral, agricultura, matorral, plantación forestal, bosque nativo (Cauquenes) y bosque nativo (Trancura) .....	7
<b>Figura 3.</b> Esquema de profundidades de estaciones de monitoreo de HS.....	7
<b>Figura 4.</b> A. Ubicación sitios Diviner B. Número de mediciones .....	9
<b>Figura 5.</b> Esquema de profundidades productos grillados. A. Representa las profundidades de ERA5-Land y ERA5; y B. las profundidades de SPL4SMAU, SPL3SMP_E (solo SSM) y SPL2SMAP_S (solo SSM). ....	10
<b>Figura 6.</b> Diagrama resumen del conjunto de métodos utilizados en la presente investigación. Las flechas continuas guían el orden cronológico principal de la investigación. Los rectángulos segmentados señalan al objetivo específico correspondiente que responde los procesos.....	12
<b>Figura 7.</b> Esquema clasificación eventos de precipitación. ....	17
<b>Figura 8.</b> Métricas de bondad de ajuste para SSM horaria. A. Número de mediciones, B. <i>ubRMSE</i> , C. <i>PBIAS</i> , D. <i>r</i> y E. <i>KGE</i> y <i>RZSM</i> horaria F. número de mediciones, G. <i>ubRMSE</i> ,	

H. <i>PBIAS</i> , I. <i>r</i> y J. <i>KGE</i> . Las barras en color verde muestran el desempeño para ERA5, en color morado para ERA5-Land y color azul para SPL4SMAU; la zona amarilla representa el rango de valores de un desempeño excelente. ....	20
<b>Figura 9.</b> Métricas de bondad de ajuste para SSM diaria. A. Número de mediciones, B. <i>ubRMSE</i> , C. <i>PBIAS</i> , D. <i>r</i> y E. <i>KGE</i> . Las barras muestran el desempeño en color verde para ERA5, morado para ERA5-Land, azul para SPL4SMAU, naranja para SPL2SMAP_E y celeste SPL3SMP_E. La zona amarilla representa el rango de valores de un desempeño excelente. P: Petorca, M: Mapocho, C: Cauquenes y T: Trancura. ....	22
<b>Figura 10.</b> Comparación SSM <i>downscaling</i> ERA5-Land (Izquierda) y visualización HS desescalada (medio) y mediciones <i>in situ</i> (derecha). ....	24
<b>Figura 11.</b> Métricas de bondad SSM horario estacional. A. <i>ubRMSE</i> , B. <i>r</i> y C. <i>KGE</i> . I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño. ....	24
<b>Figura 12.</b> Métricas de bondad RZSM horario estacional A. <i>ubRMSE</i> , B. <i>r</i> y C. <i>KGE</i> para RZSM horario estacional. I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño. ....	25
<b>Figura 13.</b> Desempeño <i>PBIAS</i> para A. SSM y B. RZSM horario estacional. I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño. ....	26
<b>Figura 14.</b> Serie de tiempo anual de HS y eventos de precipitación. A la izquierda se presenta el primer evento de precipitación del año (mostrando el TA: Tiempo de ascenso; y A: Amplitud.), al medio, la serie temporal de RZSM y precipitación completa anual, y a la derecha, el evento más intenso del respectivo sitio. Se grafican los sitios de matorral A. SM02 y B. SM07. ....	28
<b>Figura 15.</b> Serie de tiempo anual de HS y eventos de precipitación. A la izquierda se presenta el primer evento de precipitación del año (mostrando el TA: Tiempo de ascenso; y A: Amplitud.), al medio, la serie temporal de RZSM y precipitación completa anual, y a la derecha, el evento más intenso del respectivo sitio. Se grafican los sitios de plantación forestal A. SM23 y bosque nativo B. SM1 .....	29
<b>Figura 16.</b> Boxplot de tiempo de ascenso (A.) y amplitud (B.) del primer evento (rojo) y el evento más intenso de precipitación (azul) en un año, utilizando datos derivados de las mediciones <i>in situ</i> y estimaciones de productos grillados de HS. ....	30
<b>Figura 17.</b> Métricas de bondad A. <i>ubRMSE</i> , B. <i>PBIAS</i> , C. <i>r</i> y D. <i>KGE</i> para primer evento y evento más intenso de precipitación, utilizando datos derivados de las mediciones <i>in situ</i> y estimaciones satelitales de HS. ....	31
<b>Figura 18.</b> Series de tiempo y funciones de densidad de probabilidad de RZSM. En cada sitio graficado se puede ver a la izquierda las series de tiempo y sus respectivas funciones de densidad de probabilidad a la derecha. Las líneas segmentadas amarillas señalan el CCe y el PMPe. Se grafican los sitios de A. SM02, B. SM07, C. SM23 y D. SM14. ....	33
<b>Figura 19.</b> Estimación A. PMPe, B. CCe y C. ADPe vs ChSPD (Laboratorio). En el eje X se muestran los datos en laboratorio (ChSPD), mientras que en el eje Y se presentan los valores estimados mediante las funciones de densidad de probabilidad 1. <i>in situ</i> , 2. ERA5, 3. ERA5-Land y 4. SPL4SMAU .....	34

**Figura 20.** Boxplot de A. Fecha de transición (FT) y B. Tiempo de transición (TT) utilizando datos derivados de las mediciones *in situ* y estimaciones de productos grillados de HS. ... 35

## ÍNDICE DE APÉNDICES

<b>Apéndice 1.</b> Caracterización cuencas de estudio.....	51
<b>Apéndice 1.1.</b> Descripción sitios de monitoreo de HS. Cuenca Petorca en Longatoma.....	53
<b>Apéndice 1.2.</b> Descripción sitios de monitoreo de HS. Mapocho en los Almendros.....	54
<b>Apéndice 1.3.</b> Descripción sitios de monitoreo de HS. Cauquenes en Desembocadura.....	55
<b>Apéndice 1.4.</b> Descripción sitios de monitoreo de HS. Trancura antes de LLafenco.....	56
<b>Apéndice 2.</b> Porcentaje de cobertura sitios seleccionados. ....	57
<b>Apéndice 3.</b> Selección productos grillados. ....	58
<b>Apéndice 4.</b> Descripción productos grillados de HS.....	59
<b>Apéndice 5.</b> Descripción datos Auxiliares .....	61
<b>Apéndice 6.</b> Resumen ecuaciones de calibración utilizadas en sondas EnviroSCAN .....	62
<b>Apéndice 7.</b> Ecuación calibración general Diviner 2000 .....	63
<b>Apéndice 8.</b> Descripción métricas de bondad .....	63
<b>Apéndice 9.</b> Artículos científicos de productos grillados de HS y sus respectivas métricas .....	64
<b>Apéndice 10.1.</b> Distribución espacial píxeles y sitios de monitoreo de HS. ....	66
<b>Apéndice 10.2.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM01. Matorral .	67
<b>Apéndice 10.3.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM02. Matorral .	67
<b>Apéndice 10.4.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) (abajo) Horaria. SM04. Matorral.....	68
<b>Apéndice 10.5.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM05. Matorral .	68
<b>Apéndice 10.6.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM07. Matorral .	69
<b>Apéndice 10.7.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM10. Bosque Nativo.....	69
<b>Apéndice 10.8.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM11. Bosque Nativo.....	70
<b>Apéndice 10.9.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM13. Bosque Nativo.....	70
<b>Apéndice 10.10.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM14. Bosque Nativo.....	71
<b>Apéndice 10.11.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM17. Agricultura .....	71
<b>Apéndice 10.12.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM19. Matorral .....	72
<b>Apéndice 10.13.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM21. Matorral	72

<b>Apéndice 10.14.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM23. Plantación Forestal .....	73
<b>Apéndice 10.15.</b> Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM24. Plantación Forestal .....	73
<b>Apéndice 11.1.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM01. Matorral .....	74
<b>Apéndice 11.2.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM02. Matorral .....	74
<b>Apéndice 11.3.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM04. Matorral .....	75
<b>Apéndice 11.4.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM05. Matorral .....	75
<b>Apéndice 11.5.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM07. Matorral .....	76
<b>Apéndice 11.6.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM10. Bosque Nativo .....	76
<b>Apéndice 11.7.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM11. Bosque Nativo .....	77
<b>Apéndice 11.8.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM13. Bosque Nativo .....	77
<b>Apéndice 11.9.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM14. Bosque Nativo .....	78
<b>Apéndice 11.10.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM17. Agricultura .....	78
<b>Apéndice 11.11.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM19. Matorral .....	79
<b>Apéndice 11.12.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM21. Matorral .....	79
<b>Apéndice 11.13.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM23. Plantación Forestal .....	80
<b>Apéndice 11.14.</b> Dinámica de la SSM Diaria. SM24. Plantación Forestal .....	80
<b>Apéndice 12.</b> Imágenes ERA5-Land desescaladas con GWR .....	81
<b>Apéndice 13.</b> Promedio métricas de bondad estacionales .....	81
<b>Apéndice 14.1.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM01. Bosque Nativo .....	82
<b>Apéndice 14.2.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM02. Matorral .....	83
<b>Apéndice 14.3.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM04. Matorral .....	84
<b>Apéndice 14.4.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM05. Matorral .....	85
<b>Apéndice 14.5.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM07. Matorral .....	86
<b>Apéndice 14.6.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM19. ....	87
<b>Apéndice 14.7.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM21. ....	88
<b>Apéndice 14.8.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM23. ....	89
<b>Apéndice 14.9.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM11. Pradera .....	90
<b>Apéndice 14.10.</b> Caracterización eventos de precipitación. SM14. Bosque Nativo .....	91
<b>Apéndice 15.</b> Firmas de HS sitios (Tiempo ascenso y Amplitud). ....	92
<b>Apéndice 16.</b> Métricas de bondad eventos de precipitación. ....	93
<b>Apéndice 17.1.</b> Clasificación función densidad de probabilidad .....	94
<b>Apéndice 17.2.</b> Punto de marchitez Permanente. ....	94
<b>Apéndice 17.3.</b> Capacidad de campo. ....	95
<b>Apéndice 17.4.</b> Agua disponible para las plantas. ....	95
<b>Apéndice 18.</b> Firmas HS (Fecha de transición y Tiempo de transición) .....	96

## RESUMEN

La humedad del suelo (HS) es fundamental en la interacción entre la atmósfera y la superficie terrestre, y aunque las mediciones *in situ* en Chile son limitadas, la percepción remota y la modelación ambiental han avanzado en la estimación de esta variable. Este estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de productos grillados de HS y su relación con condiciones edafotopoclimáticas y de cobertura vegetal contrastantes. Se consideraron los productos SPL4SMAU, SPL3SMP\_E, SPL2SMAP\_S, ERA5 y ERA5-Land, para contrastarlos con mediciones *in situ* de HS en catorce sitios ubicados en la zona centro-sur de Chile. Se aplicaron cuatro métricas de desempeño para evaluar la HS superficial (SSM) y en la zona de las raíces (RZSM). Para esta última variable se analizó las firmas de humedad de suelo, tiempo de ascenso (TA), amplitud (A), función de densidad de probabilidad (FDP), punto de marchitez permanente estimado (PMPe), capacidad de campo estimado (CCe), fecha de transición (FT) y el tiempo de transición (TT). Los resultados muestran que el *ubRMSE* promedio de la SSM (RZSM) para los productos horarios oscila entre 0.049 (0.028) a 0.52 (0.034) m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, con tendencia a la subestimación (PBIAS > 25.39 (46.22) %) y fuertes correlaciones ( $r > 0.72$  (0.79)). ERA5 presenta el mejor desempeño (promedio) en el *KGE* para SSM (0.21) y RZSM (0.39), seguido de ERA5-Land (0.01 y 0.19) y SPL4SMAU (0.13 y 0.16). El rendimiento de estos productos es mejor durante la primavera y disminuye en otoño. El análisis de eventos de precipitación específicos revela que ERA5 y ERA5-Land reproducen de manera efectiva el TA y la A en los eventos más intensos del año, por sobre el primer evento del año. Los productos grillados ERA5 y ERA5-Land muestran potencialidades en la estimación exacta de las propiedades de retención de agua en la RZSM, ofreciendo una representación más precisa del PMPe por sobre la CCe. En cuanto a la transición estacional, los productos generalmente retratan de forma precisa la FT de PMPe a CCe, destacando su capacidad para capturar fechas claves en la dinámica temporal anual, pero tienden a sobreestimar el TT de este periodo, resaltando una brecha en la comprensión total de la variabilidad estacional de la humedad del suelo.

**Palabras clave:** ERA5, ERA5-Land, Humedad de suelo, SMAP, Teledetección.

## ABSTRACT

Soil moisture (SM) is fundamental in the interaction between the atmosphere and the Earth's surface, and although in situ measurements in Chile are limited, remote sensing and environmental modeling have advanced in estimating this variable. This study aims to evaluate the performance of gridded SM products and their relationship with contrasting edaphotopoclimatic and vegetation cover conditions. The products considered were SPL4SMAU, SPL3SMP\_E, SPL2SMAP\_S, ERA5, and ERA5-Land, contrasting them with in situ SM measurements at fourteen sites located in the central-southern zone of Chile. Four performance metrics were applied to evaluate surface SM (SSM) and root zone SM (RZSM). For this latter variable, soil moisture signatures, rise time (TA), amplitude (A), probability density function (FDP), estimated permanent wilting point (PMPe), estimated field capacity (CCe), transition date (FT), and transition time (TT) were analyzed. The results show that the average ubRMSE of SSM (RZSM) for hourly products ranges from 0.049 (0.028) to 0.52 (0.034) m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, with a tendency to underestimate (PBIAS > 25.39 (46.22) %) and strong correlations ( $r > 0.72$  (0.79)). ERA5 exhibits the best performance (average) in KGE for SSM (0.21) and RZSM (0.39), followed by ERA5-Land (0.01 and 0.19) and SPL4SMAU (0.13 and 0.16). The performance of these products is better during spring and decreases in autumn. Specific precipitation event analysis reveals that ERA5 and ERA5-Land effectively reproduce TA and A in the most intense events of the year, over the first event of the year. Gridded products ERA5 and ERA5-Land show potential in accurately estimating water retention properties in RZSM, offering a more precise representation of PMPe over CCe. Regarding seasonal transition, products generally accurately depict the FT from PMPe to CCe, highlighting their ability to capture key dates in the annual temporal dynamics, but tend to overestimate the TT of this period, emphasizing a gap in the total understanding of seasonal variability in soil moisture.

**Keyword:** ERA5, ERA-Land, Soil moisture, SMAP, Remote sensing.

## 1. INTRODUCCIÓN

La humedad del suelo (HS; *Soil Moisture* en inglés) desempeña un papel esencial dentro del sistema terrestre, influenciando procesos hidrológicos como la infiltración, escorrentía y evaporación (Ling et al., 2021; Saeedi et al., 2021). Esta no solo es crucial para las interacciones entre la tierra y la atmósfera, sino que también determina la disponibilidad de agua para la vegetación (Peng et al., 2021). La obtención de estimaciones precisas de HS es, por tanto, fundamental para una amplia gama de aplicaciones, incluido el monitoreo ambiental y agrícola, el pronóstico del tiempo y la evaluación de los impactos climáticos, resaltando su importancia en la mejora de predicciones y en el manejo de recursos naturales (Peng et al., 2017; Warner et al., 2021).

En la actualidad, los datos de HS se obtienen a través de varios enfoques, que incluyen la medición *in situ*, la observación satelital y la simulación mediante modelos de la superficie terrestre. Las mediciones *in situ* se benefician de redes densas de monitoreo establecidas en países del hemisferio norte (Beck et al., 2021), destacándose proyectos como TERRENO (Zacharias et al., 2011), Oznet (Smith et al., 2012), COSMOS-UK (Evans et al., 2016) y la International Soil Moisture Network (ISMN) (Dorigo et al., 2021). En Chile, aunque existen 4 estaciones pertenecientes a la ISMN de LAB-net (Mattar et al., 2016a), no tienen datos actualizados disponibles para la descarga.

Respecto a la obtención de la HS a través de observación satelital y modelos de superficie terrestre, en las últimas décadas, se han desarrollado numerosos productos grillados de humedad del suelo, los cuales varían en términos de génesis, resolución espacial, temporal y cobertura geográfica (Beck et al., 2021; Peng et al., 2021; Warner et al., 2021). Dentro de los derivados directamente de observaciones satelitales, la banda L (1–2 GHz) se ha identificado como la óptima para la recuperación de la HS, debido a que minimiza la influencia atmosférica y reduce la absorción o reflexión por parte de la vegetación (Peng et al., 2017; Peng et al., 2021), aunque solo logra retratar la HS en los primeros centímetros del suelo (*Surface Soil Moisture* [SSM]). Las misiones Soil Moisture Active Passive (SMAP) y Soil Moisture Ocean Sanility (SMOS), equipadas con instrumentos de microondas de banda L, son los únicos satélites en órbita dedicados exclusivamente a la medición de la SSM (O'Neill et al., 2021a).

En cuanto a los modelos de superficie terrestre, se distinguen principalmente por su enfoque hacia la integración de datos: unos proceden sin asimilar datos satelitales de HS, mientras que otros sí los incluyen. Dentro de los modelos con asimilación de datos destaca el reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés), mientras que modelos sin asimilación de datos de HS destaca ERA5-Land, también de esta organización. Estos dos productos grillados representan herramientas valiosas en el estudio de la HS, ya que permiten retratar la dinámica de la HS hasta 1 metro de profundidad (*Root Zone Soil Moisture* [RZSM]) y con una mayor cobertura temporal, como lo es datos a escala horaria (Reichle et al., 2022).

Estos modelos de superficie han sido evaluados y calibrados gracias a las densas redes de monitoreo de HS, predominantemente situadas en América del Norte y Europa, dejando una notable brecha en la cobertura global de estaciones (Dorigo et al., 2021). Esta situación se traduce en una menor cantidad de estudios de evaluación de las mediciones *in situ* frente a productos grillados de HS en Latinoamérica. La utilización de ERA5 en Argentina (Lal et al., 2022), SMOS en Brasil (Rosatto et al., 2020) y SMOS en Chile (Santamaría-Artigas et al., 2016; Olivares, 2016; Uribe, 2016) son algunos de los pocos ejemplos encontrados a nivel latinoamericano. Sin embargo, se centran en productos de generaciones anteriores, se limitan en la variedad de condiciones ecosistémicas analizadas y analizan exclusivamente la SSM, sin considerar la RZSM.

La importancia de estudiar la RZSM radica en que, capas más profundas actúan como reservorios de agua, esenciales para sostener la vegetación durante períodos de sequía y contribuir a la recarga de acuíferos (Lai et al., 2023). Ambos extremos en los niveles de humedad, tanto el secado como la humectación, pueden impactar significativamente el funcionamiento del sistema terrestre (Araki et al., 2022). Por ejemplo, un contenido bajo de RZSM puede contribuir a la propagación de incendios forestales y olas de calor, mientras que un alto contenido de RZSM cuando coincide con aire cálido, puede dar lugar a temperaturas críticas para los bulbos de algunas especies (Moon y Ha, 2019)

En el Sexto Informe de Evaluación (AR6) de Douville et al. (2021) del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), se señala que, para finales del siglo XXI, el contenido de HS disminuirá en regiones semiáridas, y se espera una aridificación con alta confianza, en el centro de Chile, incluso en escenarios climáticos de bajas emisiones. Frente a esta preocupante perspectiva, la necesidad de métodos innovadores para caracterizar la HS ha cobrado relevancia. Emergen así las firmas de HS, métricas que cuantifican los aspectos dinámicos de las series temporales de HS y facilitan evaluaciones de modelos basados en procesos, como describen Araki et al. (2022). Estas firmas permiten, por ejemplo, comparar la respuesta de la HS ante eventos de precipitación o su capacidad de retención de agua, según detalla O'Neill et al. (2021). Dada su utilidad, se destaca la necesidad de extender el uso de firmas de HS para evaluar el desempeño de productos grillados frente a mediciones *in situ* en variados entornos ecológicos, particularmente en procesos como la respuesta de la HS ante diferentes eventos de precipitación.

En este estudio, se presenta una evaluación integral de cinco productos de HS, basados en modelos y observaciones satelitales para la zona centro-sur de Chile. Esta evaluación exhaustiva utiliza datos *in situ* provenientes de 14 sitios de monitoreo de los proyectos Fondecyt 1210932 y ANID PCI NSFC 190018, distribuidos en cuatro cuencas que exhiben una diversidad de condiciones edafotopoclimáticas. Además, se realiza una evaluación detallada de la RZSM mediante el cálculo de firmas de HS derivadas de los productos grillados, tales como el tiempo de ascenso y amplitud frente a eventos de precipitación; y las propiedades de retención de HS. Este estudio es significativo por extender la evaluación de productos grillados de humedad del suelo en contextos edafotopoclimáticos contrastantes, incorporar productos previamente no examinados (ERA5-Land, SPL4SMAU y SPL2SMAP\_S) y por evaluar la SSM y la RZSM.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño de productos de estimación humedad del suelo y su relación con condiciones edafotopoclimáticas y de cobertura vegetal contrastantes en la zona centro-sur de Chile

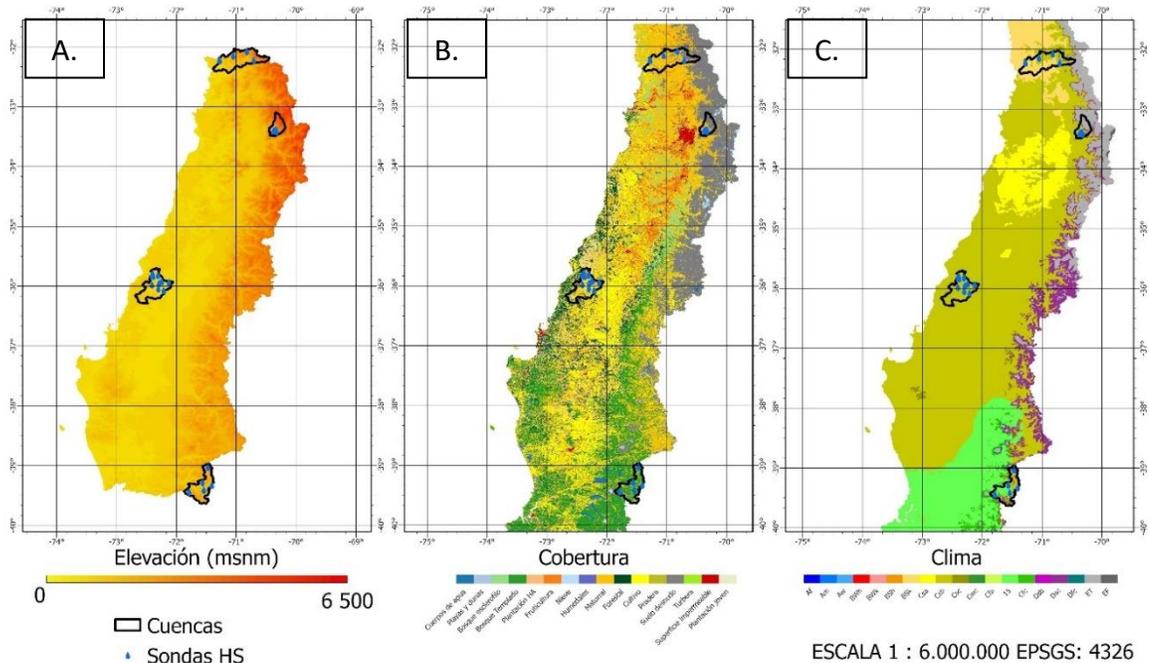
### 2.2. Objetivos específicos:

- Evaluar el desempeño de productos grillados de humedad de suelo contra datos *in situ*
- Evaluar la variación estacional de productos grillados de humedad de suelo
- Analizar la respuesta de la humedad del suelo ante diferentes eventos de precipitación
- Analizar la relación de la humedad del suelo grillada y las propiedades de retención de agua en el suelo, bajo condiciones de cobertura de suelo contrastantes

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Área de Estudio

La evaluación de los productos grillados de HS se realizó en cuatro cuencas de Chile a distintas longitudes y latitudes del país (Figura 1), su caracterización se presenta en el Apéndice 1. Los datos de HS utilizados corresponden a 14 sitios distribuidos espacialmente en: la cuenca del río Petorca en Longotoma (4), entre los  $-32.01^\circ$  y  $-32.44^\circ$  de latitud y entre los  $-72.39^\circ$  y  $-70.45^\circ$  de longitud, de la región de Valparaíso; la cuenca de Mapocho en los Almendros (1), entre los  $-33.10^\circ$  y  $-33.49^\circ$  de latitud y entre los  $-70.18^\circ$  y  $-70.45^\circ$  de longitud, de la región Metropolitana; cuenca del río Cauquenes en Desembocadura (5), entre los  $-35.70^\circ$  y  $-36.29^\circ$  de latitud y los  $-72.05^\circ$  y  $-72.69^\circ$  de longitud, ubicada en la región del Maule y región del Ñuble; y la cuenca del Río Trancura antes de Llafenco (4), entre los  $-38.97^\circ$  y  $-39.64^\circ$  de latitud y entre los  $-71.37^\circ$  y  $-71.87^\circ$  de longitud, en la región de la Araucanía.



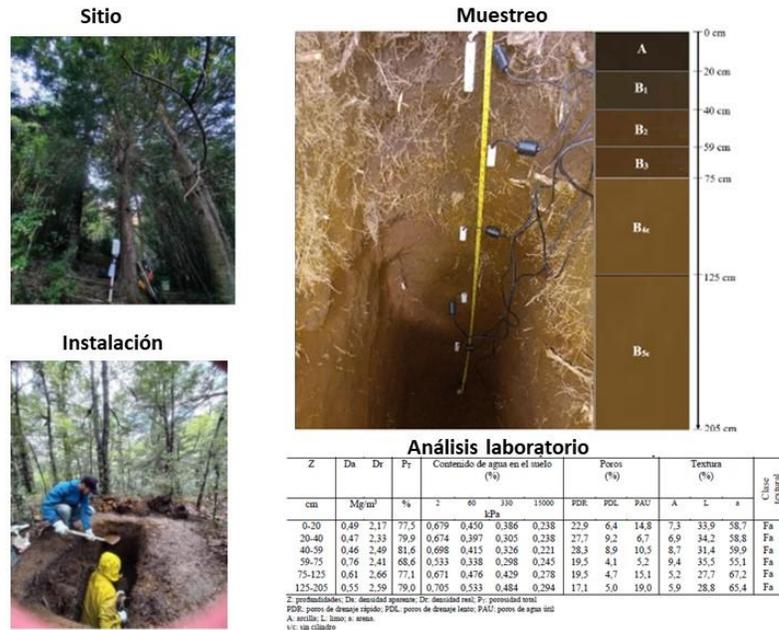
**Figura 1. A. Elevación B. Clima C. Cobertura.**

#### 3.1.1. Estaciones de monitoreo de humedad de suelo

En la Figura 2 se muestran los tipos de sitios que fueron seleccionados para monitorear la HS. A modo de ejemplo, en la Figura 3 se señala como fueron instalados los sensores de HS y los muestreos edafológicos que se realizaron cercanos a los sitios. Este análisis fue replicado a la mayoría de los sitios que se describen en los Apéndice 1.1 al 1.4 y los cuales forman parte de *Chilean soil profile database VI* (ChSPD<sup>1</sup>). Este corresponde a una base de datos de perfiles de suelo para Chile que abarca una amplia gama de ecosistemas y condiciones climática, entregando información de propiedades físicas, hidráulicas y químicas del suelo (Seguel et al., 2023).



**Figura 2.** De izquierda a derecha, sitios de monitoreo de HS: matorral, agricultura, matorral, plantación forestal, bosque nativo (Cauquenes) y bosque nativo (Trancura)



**Figura 3.** Esquema de profundidades de estaciones de monitoreo de HS

<sup>1</sup> <https://zenodo.org/records/7846566>

## 3.2. Materiales

### 3.2.1. Datos *in situ* de humedad de suelo

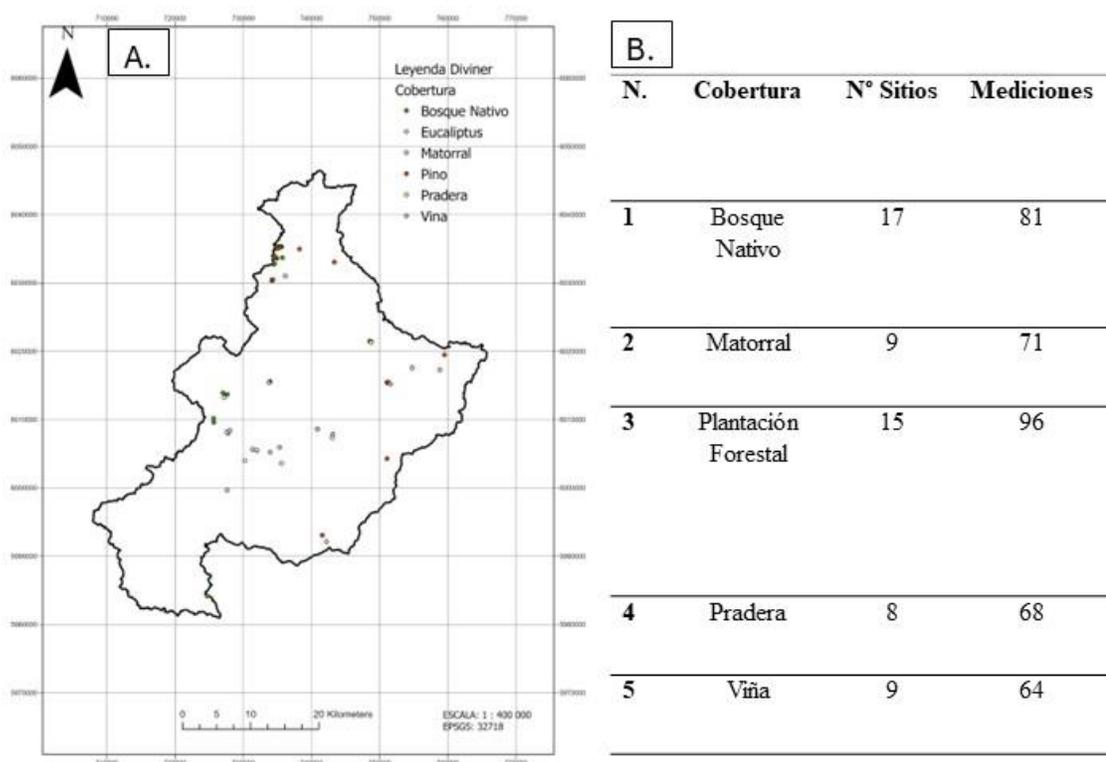
Los datos de HS en terreno fueron adquiridos mediante la instalación de tubos de acceso para medir con el instrumento EnviroSCAN; mientras que los sensores TEROS 10 y TEROS 12 (anexas a un datalogger ZL6) fueron instaladas directamente en el horizonte del suelo (Cuadro 1). Estos sensores en terreno fueron instalados en el marco de los proyectos FONDECYT 1171560, 1210932 y ANID 190018. Los 14 sitios fueron seleccionados (entre los proyectos existe una suma de 31 sensores de HS) según la representatividad de coberturas de suelo abarcada por los píxeles de los productos grillados (Apéndice 2), eligiendo un sitio de monitoreo coincidente con la cobertura de suelo con mayor porcentaje si es que era posible.

**Cuadro 1.** Características de sondas en terreno

N	Cobertura	Cuenc a	ID	Especie Dominante	Sens or	Elev.	Lat (°)	Lon (°)	Prof. Sensor (cms)	Inicio Obs.
1	Bosque Nativo	P	SM01	<i>Criptomycaria alba</i>	Z16	574	-32,22	-71,28	10,30,50,80, 130	2021-05-27
2	Matorral	P	SM02	<i>Colliguaja odorifera</i>	Z16	879	-32,15	-71,05	10,30,50,80, 120	2021-06-10
3	Matorral	P	SM04	<i>Proustia cuneifolia</i>	Z16	1386	-32,08	-70,82	10,40,80,11 0	2021-09-15
4	Matorral	P	SM05	<i>Porlieria chilensis</i>	Z16	1240	-32,23	-70,71	10,40,70,11 5	2021-09-15
5	Matorral	M	SM08	<i>Trevoa trinervis</i>	Z16	1469	-33,39	-70,33	10,30,80,12 0	2021-06-30
6	Bosque Nativo	T	SM10	<i>Nothofagus dombeyi</i>	Z16	861	-39,44	-71,79	10,30,70,12 0,160,200	2021-11-04
7	Pradera	T	SM11	<i>Pradera</i>	Z16	401	-39,41	-71,54	10,30,60,11 0	2021-11-04
8	Bosque Nativo	T	SM13	<i>Podocarpus nubigenus</i>	Z16	850	-39,28	-71,56	10,30,60,10 0,150,200	2021-11-06
9	Bosque Nativo	T	SM14	<i>Nothofagus antarctica</i>	Z16	1041	-39,02	-71,47	10,30,70,11 5	2021-11-07
10	Agricultura	C	SM17	<i>Vitis vinifera</i>	Env	221	-35,98	-72,41	20,50,80,12 0,170	2018-04-28
11	Matorral	C	SM19	<i>Vachellia caven</i>	Env	156	-35,95	-72,29	20,50,80,12 0,150	2019-04-25
12	Matorral	C	SM21	<i>Vachellia caven</i>	Env	171	-35,95	-72,29	40, 90, 120, 170	2018-12-14
13	Plantación Forestal	C	SM23	<i>Pinus radiata</i>	Env	509	-35,95	-72,29	20,40,60,90, 130,160	2018-07-18

14	Plantación Forestal	C	SM24	<i>Pinus radiata</i>	Env	259	-35,82	-72,31	20,40,70,80,130	2018-07-18
----	---------------------	---	------	----------------------	-----	-----	--------	--------	-----------------	------------

Sumado a lo anterior, existen mediciones discretas realizadas con el instrumento portátil Diviner 2000, que consta de una sonda (la cual necesita de un tubo de acceso en el suelo, los mismos que EnviroSCAN) y un datalogger de mano, donde queda registrada y almacenada la información de agua volumétrica en intervalos de 0.1 m y hasta los 1,6 m (Ramírez, 2021). Estas mediciones fueron realizadas en campañas a terreno de carácter bimensual, partiendo desde el año 2017 hasta el presente, pero exclusivamente en la cuenca de Cauquenes (Ver Figura 4).



**Figura 4. A.** Ubicación sitios Diviner **B.** Número de mediciones

### 3.2.2. Datos grillados de humedad de suelo

Los productos grillados de HS se encuentran en el Cuadro 2. Estos fueron seleccionados según los criterios que se presentan en el [Apéndice 3](#) (en el Anexo 2 se presentan otros productos grillados de HS disponibles). Complementariamente, en el [Apéndice 4](#) se presenta la descripción detallada de los productos grillados de HS seleccionados y su respectiva plataforma de descarga. Se utilizan los productos de la NASA; SPL3SMP\_E (O'Neill et al., 2021a), SPL4SMAU (Reichle et al., 2020) y SPL2SMAP\_S\_S (Das et al., 2019; Das et al.,

2020), y del ECMWF; ERA5 (Bell et al., 2021) y ERA5-Land (Muñoz et al., 2019); los cuales son representados por en la Figura 5.

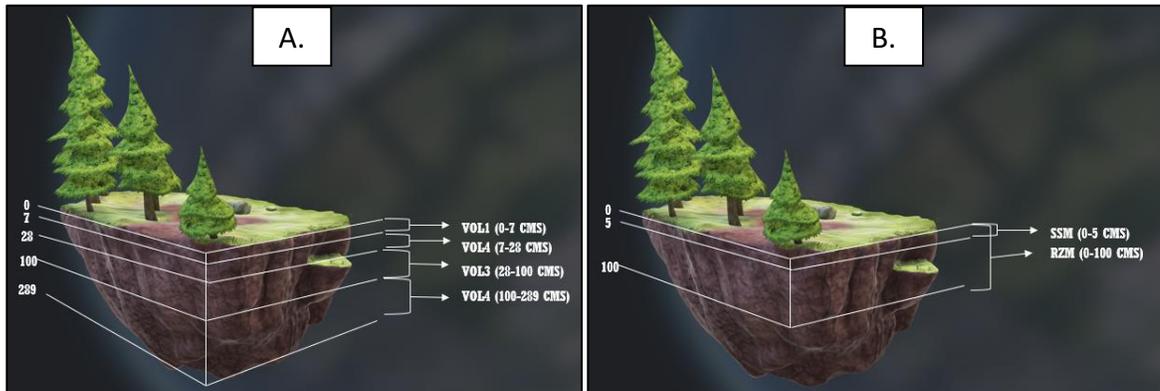
**Cuadro 2.** Productos grillados de humedad de suelo

Variable	Nombre producto	Rango cobertura	Resolución espacial	Resolución temporal	Parámetros
Productos de observaciones satelitales	SPL3SMP_E	2015- Presente	9 km	2 -3 días	sm 0-5 cms ( $m^3m^{-3}$ )
Productos de modelos sin asimilación	ERA5-Land	1950- Presente	~9 km	1 hora	sm 0-289 cms ( $m^3m^{-3}$ )
Productos de modelos con asimilación de datos satelitales	SPL4SMAU	2015- Presente	9 km	3 horas	sm 0-5 cms ( $m^3m^{-3}$ ) sm 0-100 cms ( $m^3m^{-3}$ )
	SPL2SMAP_S_S_3km	2015- Presente	3 km 1 km	Diaría (Variable)	sm 0-5 cms ( $m^3m^{-3}$ )
	ERA5	1940- Presente	~31 km	1 hora	sm 0-289 cms ( $m^3m^{-3}$ )

<sup>1</sup> Este

producto posee estimaciones para las profundidades de 0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 cms, respectivamente

<sup>2</sup> Idem



**Figura 5.** Esquema de profundidades de productos grillados para **A.** ERA5-Land y ERA5; y **B.** de SPL4SMAU, SPL3SMP\_E (solo SSM) y SPL2SMAP\_S (solo SSM).

### 3.2.3. Datos auxiliares

Los datos auxiliares utilizados corresponden a información espacial sobre cuencas extraída de CAMELS-CL (Álvarez-Garretón et al., 2018), Clasificación climática de Köppen-Geiger (Beck et al., 2018), Landcover Zona Centro-Sur Chile (Ceballos et al., 2018), Productos grillados de precipitación del Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2, s.f.), Topografía mediante el producto ASTER GDEM (IDE, s.f), temperatura en la superficie de MODIS (Wan, et al., 2015) y datos de perfiles suelo de *Chilean soil profile database V1* (ChSPD) (Seguel et al., 2023), los cuales se presentan en el Cuadro 3 y se describen en detalle en el [Apéndice 4](#).

**Cuadro 3.** Productos auxiliares utilizados

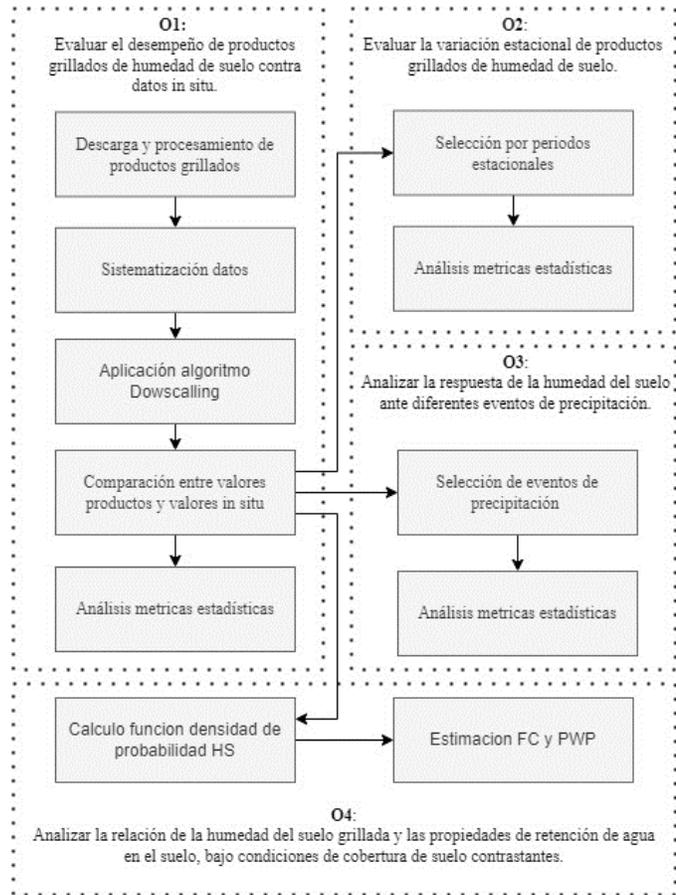
<b>Variable</b>	<b>Nombre producto</b>	<b>Rango cobertura</b>	<b>Resolución espacial</b>	<b>Resolución temporal</b>	<b>Parámetros</b>
<b>Cobertura y uso de suelo</b>	Landcover Chile	2014	30 m	-	Coberturas de suelo
<b>Datos satelitales MODIS</b>	MYD11A1	2002-Presente	1 km	1 día	LST
<b>Precipitación</b>	CR2	1979-2021	~5 km	1 hora	pp <i>mm</i>
	Pluviómetros	2017-Presente	20 puntos	1 hora	pp <i>mm</i>
<b>Modelo de elevación digital</b>	ASTER DEM	2006	30 m	-	msnm
<b>Perfiles de suelo</b>	ChSPD	-	Puntual	-	FC y PWP

### 3.2.4. Hardware

Para este trabajo se utilizará una máquina con procesador Intel Core i7-9750H (2.6 GHz) de 6 núcleos (12 hilos), 8GB de memoria RAM y un disco duro de SSD de 256 GB de almacenamiento, sumado a un disco duro HDR de 1TB de almacenamiento.

## 3.3 Métodos

La Figura 6 resume el flujo de trabajo que se realizó para cumplir los objetivos de este trabajo.



**Figura 6.** Diagrama resumen del conjunto de métodos utilizados en la presente investigación. Las flechas continuas guían el orden cronológico principal de la investigación. Los rectángulos segmentados señalan al objetivo específico correspondiente que responde los procesos.

### 3.3.1. Evaluar el desempeño de productos grillados de humedad de suelo contra datos *in situ*

#### 3.3.2.1 Descarga de datos grillados

En una primera instancia se descargaron<sup>2</sup> todos los productos grillados utilizando el ambiente estadístico R versión 3.6.3 (R Development Core Team, 2020). Los productos SMAP (SPL3SMP\_E, SPL4SMAU, SPL2SMAP\_S), fueron descargados mediante las funciones del paquete “smapr” (Josep, Oakley & Schira, 2019) y procesados con el paquete “ncdf4”,

<sup>2</sup> Los scripts desarrollados se encuentran en [https://github.com/danielnunezibarra/SoilMoisture\\_Download](https://github.com/danielnunezibarra/SoilMoisture_Download)

mientras que para ERA5-Land y ERA5 se descargó usando el paquete “ecmwf” (Hufkens, Stauffer & Campitelli, 2019) y se procesó con el paquete “rhdf5” .

Los datos descargados se transformaron a formato raster para utilizar las funciones del paquete “raster” (Hijmans, 2023). Se estableció la misma proyección para los productos grillados como al momento de utilizar los polígonos descargados de la plataforma CAMELS-CL y las coordenadas de los sitios de estudio, la cual corresponde a EPSG:4326.

### 3.3.2.2 Series temporales de humedad del suelo

Las sondas EnviroSCAN y TEROS (modelos 10 y 12), tienen diferencias al momento de capturar la HS, ya que EnviroSCAN, aunque puede retratar las condiciones de HS de manera precisa (Caicedo-Rosero et al., 2021), necesita ecuaciones de calibración particulares para cada sitio y para cada profundidad censada (Ramírez, 2021). Este proceso puede ser costoso, tanto por la toma de datos en terreno, como el procesamiento de las muestras en el laboratorio, sobre todo si se considera que se deben tener muestras a lo largo del año, para así captar la variabilidad temporal o la respuesta ante eventos de precipitación (Dobriyal et al., 2012; Farahani et al., 2014). Los datos de sondas EnviroSCAN fueron previamente calibrados con las ecuaciones del [Apéndice 6](#), las cuales son derivadas de muestreos en laboratorio.

Para la extracción de valores de los productos grillados se utilizó la modalidad de evaluación punto-píxel, extrayendo los valores con la función *extract* del paquete “raster”. Luego, se combinaron con las bases de datos de los valores *in situ* utilizando funciones del paquete “tidyverse” (Wickham et al., 2019), como *inner\_join*. Este método de unión asegura que solo se incluyan en el conjunto de datos resultante aquellas filas que tienen un equivalente en ambas bases de datos. De esta forma, se conservan solo las observaciones que están presentes tanto en los datos *in situ* como en las estimaciones de productos grillados, lo que garantiza una comparación directa y precisa entre las diferentes fuentes de datos y permite facilitar el análisis y posterior visualización de los datos

#### 3.3.2.2.1 Humedad del suelo superficial (SSM)

La HS superficial es considerada de 0-5 cms (*sm\_surface*) para SPL4SMAU, SPL3SMP y SPL2SMAP. Para ERA5 y ERA5-Land se ocupa la primera capa que entrega el contenido de HS de 0-7 cms (*volumetric soil water 1*), mientras que para las mediciones *in situ*, se utiliza el sensor con menor profundidad del sitio de monitoreo, el cual es generalmente de 0-10 cms.

### 3.3.2.2 Creación de HS equivalente para 0-100 cm (RZSM)

Debido a que los distintos puntos de monitoreo de la HS tienen profundidades heterogéneas entre los registros se estandarizaron las mediciones para tener estimaciones en las mismas profundidades. Esta estandarización se hizo considerando la profundidad 0-100 cm (HS en la zona de las raíces [RZSM]), utilizando la variable *sm\_rootzone\_analysis* de SPL4SMAU como referencia.

Para las mediciones de los datos *in situ* y de ERA5 y ERA5-Land se utilizó la metodología de Malone et al. (2009) en la que se utilizan “spline” de igual área (“equal-area splines”) (Bishop et al., 1999; Malone et al., 2009 citados por Dinamarca, 2021) los que fueron implementados mediante el paquete “ithir” (Malone, 2016) entregando una estimación de la RZSM (0-100 cms) según las diferentes profundidades. Para ERA5 y ERA5-Land se utilizan las variables *volumetric soil water 1* (0-7 cms), *volumetric soil water 2* (7-28 cms) y *volumetric soil water 3* (28-100 cms) para generar una estimación al nivel RZSM (0-100 cms).

### 3.3.2.3 Implementación de reducción de escala (*Downscaling*)

El *Downscaling* surge como una fuerte herramienta de modelación para estudios ambientales, ya que los datos de observación a gran escala espacial, aunque útiles para tendencias generales, a menudo no reflejan las complejidades locales ni la variabilidad espacial necesaria para aplicaciones detalladas. Al transformar datos de resolución más baja a una escala más refinada, se pueden generar pronósticos más precisos y realizar evaluaciones de riesgo relevantes a nivel local, lo que es vital para las decisiones en agricultura, conservación y planificación territorial (Peng et al., 2021). En la cuenca de Cauquenes, el *Downscaling* permite cobra importancia a evaluar la HS considerando la topografía y uso del suelo específicos de la zona, lo que podría permitir un avance en la gestión de recursos y planificación territorial (Samuel et al., 2008).

Se utilizó el método de la Regresión Ponderada Geográficamente (GWR, por sus siglas en inglés) en el producto grillado de ERA5-Land. Se utilizó en función de su velocidad relativa, simplicidad y rendimiento demostrado en trabajos anteriores de reducción de escala de SSM a escalas más grandes (Jin et al., 2021; Song et al., 2019).

La reducción de escala se realizó en la cuenca de Cauquenes debido a la existencia de mediciones puntuales tomadas en diversas campañas a terrenos por el equipo de trabajo del proyecto FONDECYT 1171560 con la sonda Diviner (Figura 4), entregando una mayor cantidad de puntos con estimaciones de HS distribuidas en el espacio.

Se utilizaron las siguientes variables estáticas de: modelo de elevación digital (DEM), pendiente, aspecto, *Topographic Wetness Index* (TWI). Mientras que como variables dinámicas en el tiempo se utilizaron: temperatura de la tierra (MODIS-LST) y precipitación

(PCP-CR2MET v2.5-1km). Estas fueron procesadas y armonizadas a una única resolución espacial de 1 km, utilizando la grilla EPSG 32718, la cual permite tener la resolución espacial en metros y no en grados. Se utilizó ERA5-Land y las imágenes MODIS que coincidieran con las coberturas temporales de las mediciones realizadas con Diviner (sumando las sondas continuas) gracias a la función de *Downscaling* del software gratuito SAGA-GIS (Böhner et al., 2006), donde se utilizan el tipo de *kernel* y el tamaño de banda predeterminado para el modelamiento. El producto grillado generado fue denominado como **ERA5-Land.Downscaled**.

### 3.3.2.4 Evaluación temporal de los datos grillados de humedad de suelo

La **evaluación temporal de los datos grillados** de HS se realizó a escala horaria y diaria, utilizando las métricas de bondad señaladas en la Sección 3.3.2.5 (“Análisis estadístico”). A **escala horaria** se evaluó las SSM y la RZSM entre datos *in situ*, ERA5 y ERA5-Land. Para el caso de SPL4SMAU, el cual entrega estimaciones cada 3 horas, se hizo la comparación con estimación de las sondas a la hora correspondiente. Se utilizó un huso horario coincidente para todos los datos, el cual corresponde a UTC-3.

A **escala diaria** se evaluó solo la SSM, ya que el producto SPL3SMP\_E (y SPL2SMAP\_S) solo entregan esta variable. Para los datos *in situ*, ERA5 y ERA5-Land y SPL4SMAU, se promediaron sus valores horarios. Para el caso de los datos discretos obtenidos con Diviner, los cuales fueron previamente calibradas con la ecuación de calibración que se presenta en el Apéndice 7, se utilizaron todos los días coincidentes entre mediciones *in situ* y productos grillados, comparando la SSM con ERA5, ERA5-Land, SPL4SMAU, SPL3SMP y SPL2SMAP; y la RZSM con ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU.

### 3.3.2.5 Análisis estadístico

Se utilizaron las siguientes métricas de bondad de ajuste (descritas en detalle en el [Apéndice 8](#)), el error cuadrático medio sin sesgo (*ubRMSE*) (Entekhabi et al., 2010), el sesgo (*PBIAS*) (Yapo et al., 1996), el coeficiente de correlación (*r*) y el coeficiente de eficiencia Kling-Gupta (*KGE*) (Kling et al., 2012), los cuales son los más utilizados para la evaluación de productos de HS derivados de sensores remotos (Olivares, 2016; Mousa & Shu, 2020; Beck et al., 2021; Saeedi, 2021). En el Apéndice 9 se presenta una tabla con diversos artículos científicos con el respectivo producto grillado de HS utilizado y las métricas de bondad empleadas.

En el Cuadro 4 se presentan las fórmulas de las , donde *RS* corresponde a la HS estimada por los productos grillados, *IS* representa los valores estimados por las sondas en terreno (*in situ*), *N* es el número de mediciones;  $\overline{RS}$  y  $\overline{IS}$ , corresponden a los valores medios de los datos grillados y de los datos *in situ*; y finalmente, el *CV*, correspondientes a los coeficientes de variación de los datos grillados y de los datos *in situ* , respectivamente. Se implementaron

mediante el paquete “hydroGOF” (Zambrano-Bigiarini, 2020) en el ambiente estadístico R (R Core Team, 2021).

**Cuadro 4. Métricas estadísticas**

Métrica	Fórmula	Rango Variación	Ideal	Interpretación			
				E	B	S	I
<b>ubRMSE</b>	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RS_i - IS_i - Bias)^2}$	$[0, +\infty[$	0	$\geq 0,0$ $< 0,04$	$\geq 0,04$ $< 0,08$	$\geq 0,08$ $< 0,12$	$\geq 0,12$
<b>PBIAS</b>	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RS_i - IS_i)$	$] -\infty, +\infty[$	0	$< \%10$	$\geq \%10$ $< \%20$	$\geq \%20$ $< \%30$	$\geq 0,30$
<b>r</b>	$\frac{\sum_{i=1}^N (RS_i - \overline{RS})(IS_i - \overline{IS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (RS_i - \overline{RS})^2 (IS_i - \overline{IS})^2}}$	$[-1, 1]$	1	$\geq 0,75$	$\geq 0,65$ $< 0,75$	$\geq 0,5$ $< 0,65$	$\leq 0,5$
<b>KGE</b>	$1 - \sqrt{(R - 1)^2 + \left(\frac{CV_{RS}}{CV_{IS}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\overline{IS}}{\overline{RS}} - 1\right)^2}$	$] -\infty, 1]$	1	$\geq 0,7$	$\geq 0,3$ $< 0,7$	$\geq -0,4$ $< 0,3$	$\leq -0,4$

<sup>1</sup> E: Excelente; B: Bueno; S: Suficiente; I: Insuficiente

Fuente: Elaboración propia en base a Xu, 2020; Ramírez, 2021 y Koben et al., 2019, 2023.

### 3.3.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo

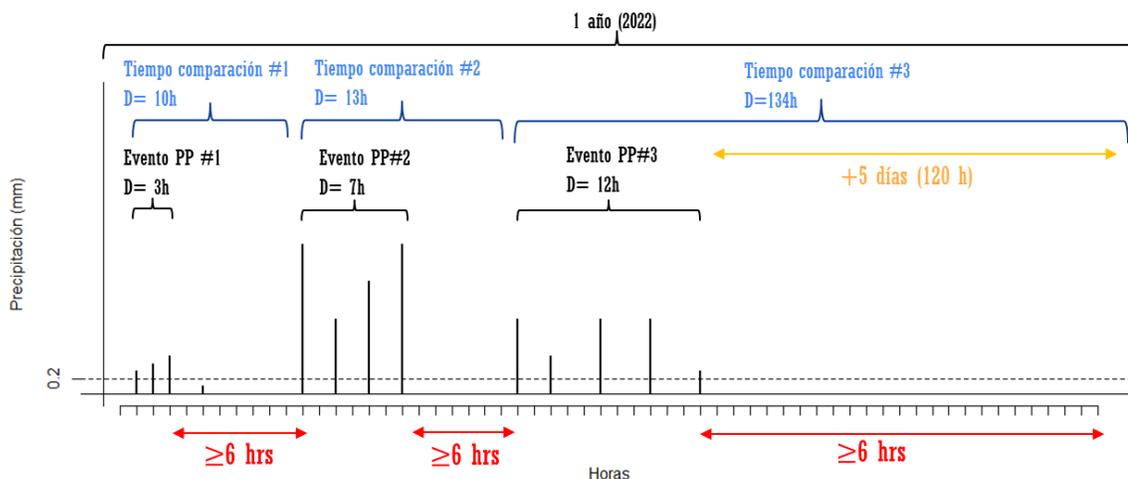
Para evaluar la variación estacional de los datos de HS estas se agruparon por estación del año (invierno, primavera, verano y otoño), utilizando aquellos sitios que tuvieran por lo menos 1 año de datos. Posteriormente se calculó el promedio para las métricas de bondad de ajuste entre los productos grillados y las observaciones en terreno. Finalmente, las métricas resultantes se representaron en gráficos de tipo radar.

### 3.3.3. Respuesta de la humedad del suelo ante diferentes eventos de precipitación

Las firmas de HS son métricas que cuantifican los aspectos dinámicos de las series temporales de HS y permiten evaluaciones de modelos basados en procesos (Draper & Reichle, 2015; Branger & McMillan, 2020; Araki et al., 2022). Destaca la necesidad de extender su uso en la evaluación del desempeño de productos grillados de HS frente a mediciones *in situ* en variados entornos ecológicos. La diversidad de condiciones ambientales en el presente estudio ofrece una oportunidad única para evaluar productos grillados de HS a través de un espectro más amplio de usos de suelo, asegurando así su relevancia y aplicabilidad en un rango más amplio de escenarios ecológicos.

En esta sección se describe un análisis de las firmas de HS (Gupta et al., 2008); Araki et al., 2022) utilizadas para cuantificar la dinámica de la HS en la zonas de estudio. En particular, esta sección utiliza las firmas basadas en eventos precipitación, el tiempo de ascenso (TA) y la amplitud (A) (Branger & McMillan , 2019).

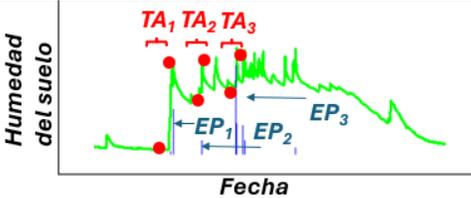
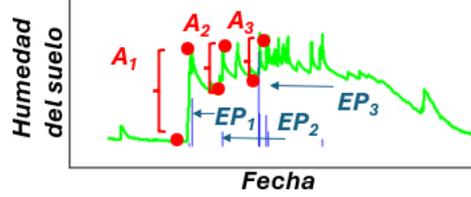
Primeramente y utilizando series temporales de precipitación horaria, se clasificaron los eventos de precipitación cercanos a los sitios de monitoreo de HS. El primer criterio (Figura 7) se enfocó en que los eventos de tormenta pertenecieran al año 2022, desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de ese año. Siguiendo a McMillan et al. (2014), Dunkerley (2019) y Araki et al. (2022), se consideraron eventos de precipitación aquellos con más de 0.2 mm/h, separados por al menos 6 horas secas (menos de 0.2 mm). El fin de un evento se definió como la primera hora trascurrida luego de cinco días después de la última precipitación, o bien como el inicio de un nuevo evento de precipitación (más de 0.2 mm). La espera de cinco días tras el último evento de precipitación es esencial para separar eventos distintos y asegurar la captura de la dinámica de la tormenta y, donde tiempos mayores, podrían verse influenciados de sobremanera por parte de la evapotranspiración (Araki et al., 2022)



**Figura 7.** Esquema clasificación eventos de precipitación.

Para el análisis, se seleccionaron dos eventos por sitio, según los criterios establecidos, el primer evento del año y el evento más intenso. Para cada evento, se calcularon dos firmas de HS: TA y A, cuyas descripciones se encuentran detalladas en el Cuadro 5. Tanto para los datos *in situ* como para los grillados, se utilizó la RZSM. Por último, se calcularon las métricas de bondad en los eventos de precipitación entre los productos grillados ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU y la RZSM *in situ* en los distintivos sitios del estudio.

**Cuadro 5.** Descripción firmas de HS por eventos de tormenta utilizadas.

Métrica	Esquema	Descripción	Fuente
Tiempo de ascenso (TA)		Tiempo entre el inicio de un evento de precipitación (EP) hasta el <i>peak</i> de HS.	Branger & McMillan (2019)
Amplitud (A)		Diferencia entre los valores de HS en su máximo y el valor de la HS al inicio del evento.	Branger & McMillan (2019)

Fuente: Elaboración Propia en base i) Branger & McMillan, (2019) ii) Araki et al., (2022).

### 3.3.4. Propiedades de retención de agua en el suelo

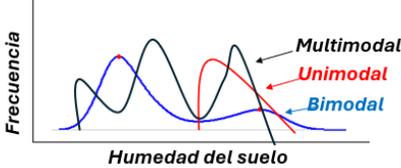
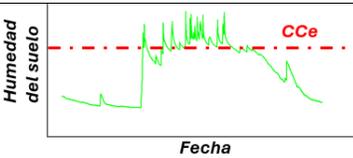
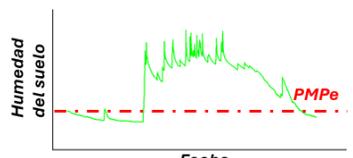
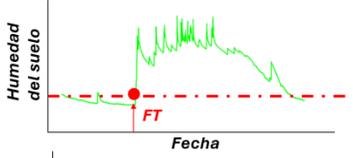
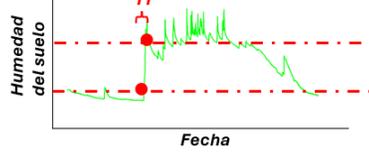
Las propiedades de retención de HS son fundamentales para la agricultura y la gestión de recursos hídricos, ya que determinan cómo el agua se almacena, se mueve y se hace accesible para las plantas (Samuel et al., 2008). Estas características influyen directamente en la disponibilidad de agua para las plantas, la eficiencia del riego y la resistencia a la sequía (McMillan et al., 2023). Entender estas propiedades permite optimizar el uso del agua, mejorar la salud del suelo, conocer sobre dinámicas ecológicas y aumentar la productividad de los cultivos, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria.

En este apartado, se llevó a cabo el análisis de las firmas de HS (Tipo de distribución, Capacidad de campo estimada, Punto de Marchitez Permanente, Fecha de Transición y Tiempo de transición) basadas tanto en temporadas específicas como en la serie temporal completa. Las series temporales de HS suelen mostrar patrones húmedos y secos estacionales, reflejando la capacidad del suelo para retener agua (Araki et al., 2022). Mediante la comparación de los valores temporales de HS con la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente obtenidos de muestras de suelo, se definieron valores derivados, nombrados capacidad de campo estimada (CCe), punto de marchitez estimado (PMPe) y Agua disponible para las plantas (ADPe), siguiendo la metodología de Araki et al. (2022) que se describe a continuación.

Para calcular la CCe y el PMPe, se empleó la función de densidad de probabilidad (FDP) de la HS (Cuadro 6), vinculada al almacenamiento de agua y su variabilidad estacional, (Samuel et al., 2008). Este proceso consta de varias etapas: primero, se eliminaron las tendencias no estacionales de la serie temporal restando la media anual (Basak et al., 2017). Luego, se aplicó un suavizado de *kernel* con doble ancho de banda, ideal para representar la FDP de distribuciones normales (Araki et al., 2022), lo cual se realizó con la función *density* del paquete “stats” (R Core Team, 2023). Posteriormente, se clasificaron las FDP como unimodales, bimodales o multimodales, esto según el número de máximos que presentaban.

El mayor y menor contenido volumétrico de HS fueron identificados como CCe y PMPe, respectivamente exclusivamente para los sitios con distribución bimodal. En casos donde los máximos de la FDP eran idénticos (distribución unimodal) o existían más de dos (multimodal), los valores fueron descartados y no se calcularon las firmas de HS restantes. Los valores de PMPe y CCe fueron comparados con mediciones de laboratorio extraídas de la base de datos ChSPD. Finalmente, se estimaron la fecha de transición (FT) y tiempo de transición (TT) para las series temporales de RZSM.

**Cuadro 6.** Descripción firmas de HS por temporada y serie temporal completa.

Métrica	Esquema	Descripción	Fuente
Tipo de distribución		La función de densidad calculada a partir de la serie temporal de HS. Según sus <i>peaks</i> se puede clasificar en unimodal, bimodal, multimodal, etc.	Branger & McMillan (2019)
Capacidad de campo estimada (CCe)		Nivel de HS máximo que el suelo puede retener después de la saturación. Es el valor más alto de HS en la FDP de distribución bimodal	Branger & McMillan (2019)
Punto de marchitez permanente estimado (PMPe)		Nivel de HS estimado en que las plantas no pueden extraer más agua. Es el valor más pequeño de HS en la FDP distribución bimodal	Branger & McMillan (2019)
Fechas de transición (FT)		Es la fecha en la cual se sobrepasa el PMPe.	Branger & McMillan (2019)
Tiempo de transición (TT)		Duración entre el paso del PMPe a Cce. Es la diferencia de tiempo entre la fecha de Transición y la Fecha en la que se llega al Cce.	Branger & McMillan (2019)

Fuente: Elaboración Propia en base i) Branger & McMillan, (2019) ii) Araki et al., (2022)

### 3.3.5. Programas y paquetes informáticos

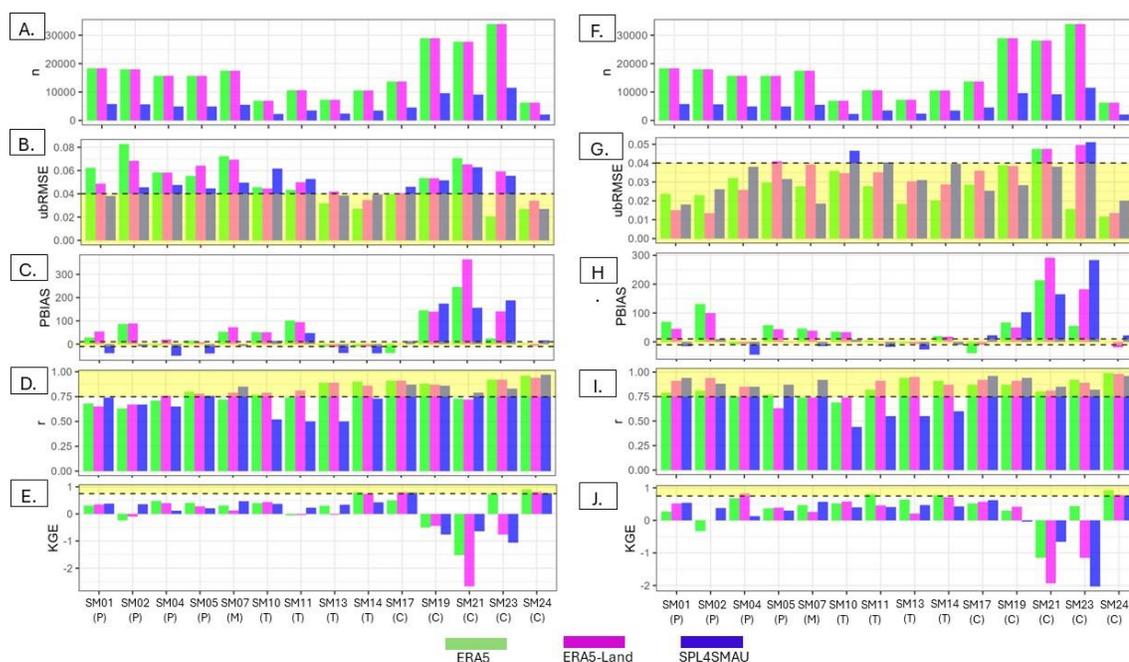
Las características espaciales del área de estudio fueron evaluadas en Quantum Qgis (QGIS) versión 3.16 (QGIS.org, 2021) y en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Los análisis estadísticos fueron trabajados en el ambiente estadístico R versión 3.6.3 (R Development Core Team, 2020), utilizando los paquetes “raster” (Hijmans, 2022), “rhdf5” (Fischer et al.,

2021), “ncdf4” (Pierce, 2021) y “smapr” (Joseph et al., 2021), entre otros paquetes de la plataforma. La modelación se realizó en SAGA GIS 6.4 (Böhner et al., 2006).

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Evaluación de productos grillados de humedad de suelo

La Figura 8 muestra las métricas de bondad relacionadas con la SSM (paneles izquierdos) y RZSM (paneles derechos), comparando las estimaciones de los distintos productos grillados frente a los datos *in situ* horarios de 14 puntos de monitoreo (uno por cada píxel). Es importante señalar que el volumen de datos analizados varía entre los distintos productos (Figura 8.A.), ya que se han incluido todas las observaciones disponibles de cada uno, abarcando el período de junio de 2018 a junio de 2023 (la dinámica temporal de la SSM y de la RZSM de cada sitio se presenta en el Apéndice 10), ya que las estaciones de monitoreo de HS comienzan a ser instaladas en Cauquenes desde esta fecha.



**Figura 8.** Métricas de bondad de ajuste para SSM horaria. **A.** Número de mediciones, **B.** *ubRMSE*, **C.** *PBIAS*, **D.** *r* y **E.** *KGE* y **RZSM horaria** **F.** número de mediciones, **G.** *ubRMSE*, **H.** *PBIAS*, **I.** *r* y **J.** *KGE*. Las barras en color verde muestran el desempeño para ERA5, en color morado para ERA5-Land y color azul para SPL4SMAU; la zona amarilla representa el rango de valores de un desempeño excelente.

Se observa que el *ubRMSE* (Figura 8.B.) de la SSM varía de manera importante entre los sitios, pero en general, ERA5 tiende a tener valores más altos en comparación con ERA5-

Land y SPL4SMAU. Este último, ha sido diseñado para tener un  $ubRMSE$  de  $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  (Reichle et al., 2020) (zona amarilla Figura 8.B.), lo que, en este estudio se cumple para la SSM en los sitios SM01 ( $0,0381 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), SM13 ( $0,0385 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), SM14 ( $0,0393 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) y SM24 ( $0,0270 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ).

El sesgo de la SSM (Figura 8.C.) evidencia que SPL4SMAU presenta más sitios (7) con  $PBIAS$  negativo (Apéndice 10) indicando una tendencia a la subestimación de valores, mientras que ERA5 y ERA5-Land tienen  $PBIAS$  negativo en cuatro sitios, siendo tres coincidentes (SM13, SM14 y SM17) entre estos dos productos grillados. En particular, los sitios ubicados en Cauquenes SM19, SM21 y SM23, muestran un alto  $PBIAS$  para ERA5 (145,7%, 245,7% y 24,6%), ERA5-Land (139,6%, 346,5% y 140,70%) y SPL4SMAU (174,2%, 156,4%, 188,2%), señalando una subestimación sistemática importante.

La mayoría de los sitios muestran buenas correlaciones (Figura 8.D.), con valores excelentes de  $r$  (mayores a 0,75) para al menos un producto grillado de SSM. En los sitios de Trancura SM10, SM11, SM13 y SM14 se evidencian valores de correlación para SPL4SMAU que no superan este margen (0,52, 0,50, 0,50 y 0,73). En cuanto al  $KGE$  (Figura 8.E.), SM19, SM21 y SM23, a pesar de un buen desempeño en la correlación, tienen los peores desempeños con respecto a esta métrica, con valores menores a -0,41.

La evaluación a la RZSM, partiendo por  $ubRMSE$  (Figura 8.G.), indica que solo cuatro sitios sobrepasan el umbral delimitado por Reichle et al., (2020) (SM08, SM10, SM19 y SM23), indicando una excelente precisión para los tres productos en la mayoría de los sitios. Las correlaciones son incluso mayores para la RZSM (Figura 8.I.) que la SSM (Figura 8.D.) en algunos sitios como SM01 y SM02, ubicados en Petorca. En particular, es destacable el desempeño de ERA5 en el sitio SM24 (PF) con valores de  $KGE$  0,93 y 0,91 para la SSM y RZSM (Ver Apéndice 10.15), respectivamente.

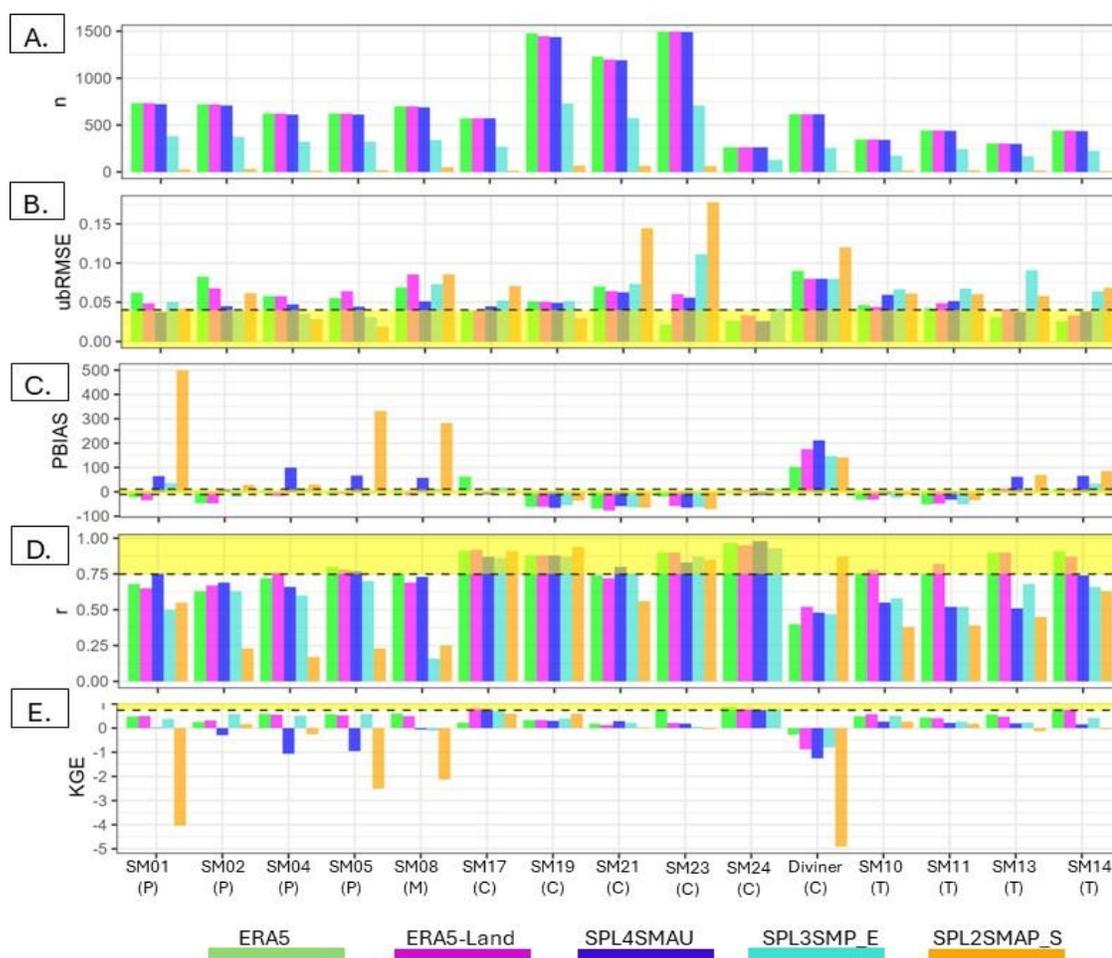
A modo de desempeño general, el promedio de los catorce sitios (Cuadro 7) evidencia que ERA5 muestra valores de  $ubRMSE$  más bajos para SSM ( $0,0493 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) y RZSM ( $0,0279 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), acompañado de una excelente correlación (0,80 para SSM y 0,83 para RZSM). ERA5-Land, presenta un empeoramiento en el sesgo para SSM ( $PBIAS= 67,56 \%$ ) y correlaciones ligeramente superiores (0,82 para SSM y 0,86 para RZSM). Por su parte, SPL4SMAU enfrenta mayores dificultades en la representación de la variabilidad de la RZSM, evidenciado por el valor promedio más bajo de  $KGE$  (0,16), aunque posee el menor  $PBIAS$  promedio (34,57 %).

**Cuadro 7.** Promedio métricas de bondad de ajuste. Escala Horaria

Producto	SSM				RZSM			
	$ubRMSE$	$PBIAS$	$r$	$KGE$	$ubRMSE$	$PBIAS$	$r$	$KGE$
ERA5	0,0493	45,77	0,80	0,21	0,0279	46,22	0,83	0,39
ERA5-Land	0,0523	67,56	0,82	0,01	0,0326	54,19	0,86	0,19
SPL4SMAU	0,0473	25,39	0,72	0,13	0,0336	34,57	0,79	0,16

La Figura 9 muestra las métricas de bondad relacionados con la SSM a escala diaria (en el Apéndice 11 se muestra la dinámica temporal de los sitios y las respectivas métricas). Los

valores de las métricas de ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU no presentan una clara diferencia con lo obtenido al evaluar a escala horaria (Figura 8). Para SPL3SMP\_E, los resultados presentan desempeños variables en los diferentes sitios, donde 9 de los 14 puntos estuvieron por encima de  $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  para el *ubRMSE*, superando el error del producto (Reichle et al., 2020). SPL2SMAP\_S presenta el menor número de imágenes coincidentes con los sitios de monitoreo de todos los productos, sumado a altos valores de *ubRMSE* en algunos sitios como el SM21 ( $0,221 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) y SM23 ( $0,178 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) (Apéndice 11.12 y 11.13), sesgos negativos en múltiples sitios y *KGE* menores a  $-0,41$ , indicando un desempeño deficiente de este producto para la zona evaluada.



**Figura 9.** Métricas de bondad de ajuste para SSM diaria. **A.** Número de mediciones, **B.** *ubRMSE*, **C.** *PBIAS*, **D.** *r* y **E.** *KGE*. Las barras muestran el desempeño en color verde para ERA5, morado para ERA5-Land, azul para SPL4SMAU, naranja para SPL2SMAP\_S y celeste SPL3SMP\_E. La zona amarilla representa el rango de valores de un desempeño excelente. P: Petorca, M: Mapocho, C: Cauquenes y T: Trancura.

Para el caso de los datos de HS extraídos con el instrumento Diviner, se observa que SMAPL2\_3KM tiene una excelente correlación lineal (0,86), pero solo coinciden 10 imágenes, a diferencia de los productos ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU, que, al ser

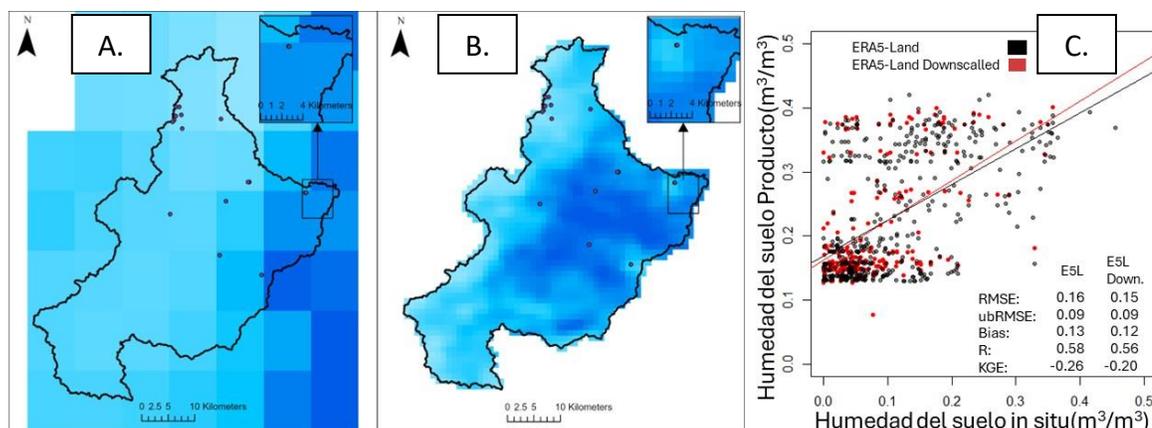
horarios, los valores fueron promediados y coincidió con todas las fechas de toma de terreno ( $n= 616$ ). Para SMAPL3 se tienen 258 observaciones coincidentes con las mediciones realizadas con Diviner. La comparación con datos Diviner presentan peores desempeños en cuanto al  $ubRMSE$  ( $>0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) que los otros sitios y todos los productos grillados tienden a sobreestimar los valores ( $PBIAS > 0$ ). Sus correlaciones son suficientes ( $r < 0.65$ ), a excepción, como se mencionaba, de SMAPL2\_3KM. La precisión general señala una insuficiencia de retratar la SSM con  $KGE < -0.4$ .

Según el Cuadro 8, ERA5 destaca con un  $ubRMSE$  de  $0,0516 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , una excelente correlación ( $r = 0,81$ ), junto con un  $KGE$  de  $0,51$  que refleja una eficiencia suficiente. ERA5-Land sigue de cerca con un  $ubRMSE$  de  $0,0535 \text{ m}^3/\text{m}^3$  y un sesgo suficiente ( $PBIAS = -14,4 \%$ ), manteniendo la misma correlación, pero con un  $KGE$  levemente reducida de  $0,50$ . SPL2SMAP\_S presenta un error de mayor magnitud, con el  $ubRMSE$  más alto ( $0,0734 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), el mayor sesgo ( $PBIAS = 88,6 \%$ ) y un desempeño insuficiente según el  $KGE$ , presentando un valor de  $-0,77$ .

**Cuadro 8.** Promedio métricas de bondad de ajuste SSM. Escala Diaria

Producto	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	0,0516	-10,4	0,81	0,51
ERA5-Land	0,0535	-14,4	0,81	0,50
SPL4SMAU	0,0486	22,1	0,73	0,06
SPL3SMP_E	0,0620	-2,57	0,66	0,40
SPL2SMAP_S	0,0734	88,6	0,53	-0,56

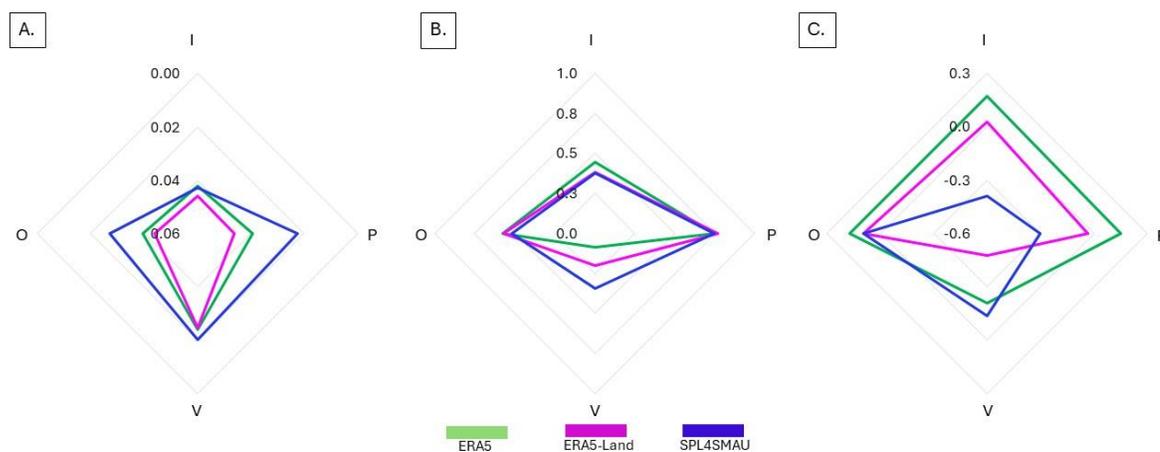
Las imágenes que se le realizaron el *Downscaling* se encuentran en el [Apéndice 12](#) y corresponden a 20 imágenes diarias para SSM entre 2018-06-06 a 2019-02-07. La cantidad de imágenes que coinciden es baja para poder retratar la variabilidad temporal de la HS en, por ejemplo, un año completo, debido a la importante pérdida de píxeles debido a la interferencia de las nubes en las imágenes MODIS LST utilizadas (Song et al., 2019). En la Figura 10 se muestra la comparación entre los productos grillados (ERA5-Land y ERA5-Land.Downscaled) y las mediciones *in situ*, existiendo ligeras mejoras (Figura 10.C.) (del orden del  $0,01$  al  $0,04$ ) en las métricas  $ubRMSE$ ,  $PBIAS$  y  $KGE$  y empeoramiento en  $r$  ( $0,02$  de diferencia).



**Figura 10.** Comparación promedio SSM *downscaling* **A.** ERA5-Land, **B.** visualización HS desescalada y **C.** comparación mediciones *in situ*.

#### 4.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo

La Figura 11 muestra las métricas de bondad promedio de los sitios para la SSM (en el Apéndice 13 se señalan los valores) a lo largo de las cuatro estaciones del año representado con graficos de radar. La primera sección (Figura 11.A) destaca el *ubRMSE* (promedio), donde en verano registra valores inferiores (ERA5= 0,0241, ERA5-Land= 0,0247 y SPL4SMAU= 0,0202  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) para esta métrica, lo que sugiere un error de menor magnitud, mientras que en invierno existen mayores valores (ERA5= 0,0421, ERA5-Land= 0,0457 y SPL4SMAU= 0,0428  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ), indicando un error de mayor magnitud para esta estación.

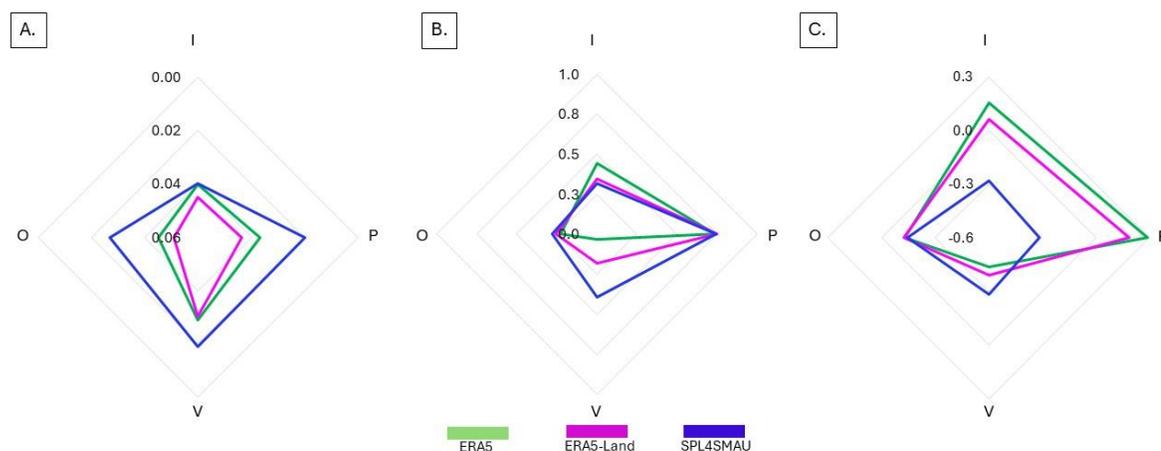


**Figura 11.** Métricas de bondad SSM horario estacional. **A.** *ubRMSE*, **B.** *r* y **C.** *KGE*.  
I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño.

En cuanto a la correlación (Figura 11.B.), en primavera se presentan los máximos valores promedio (ERA5= 0,75, ERA5-Land= 0,77 y SPL4SMAU= 0,75), destacando que en las otras estaciones los valores se encontrarían entre el rango 0,09 a 0,58. En verano existen las peores correlaciones (ERA5= 0,09, ERA5-Land= 0,20 y SPL4SMAU= 0,34). Según el *KGE*

(Figura 11.C.), ERA5 se posiciona como el producto grillado más estable en las cuatro estaciones (Invierno= 0,17, Primavera= 0,15, Verano= -0,21 y Otoño= 0,17), con dificultad para retratar en la temporada estival. Mientras que ERA5-Land (0,10) y SPL4SMAU (0,10) poseen un mejor desempeño en otoño.

La Figura 12 presenta los gráficos de radar para la RZSM. Dentro de la primera sección (Figura 12.A), el análisis del *ubRMSE* revela una variación estacional significativa: durante el verano, los valores son menores (ERA5= 0,0235, ERA5-Land= 0,0252, SPL4SMAU= 0,0219), lo que indica una mayor precisión en las estimaciones de la humedad de la zona radicular. En contraste, los valores de invierno (ERA5= 0,0402, ERA5-Land= 0,0449, SPL4SMAU= 0,0398) sugieren un incremento en el error de estimación para esta estación.

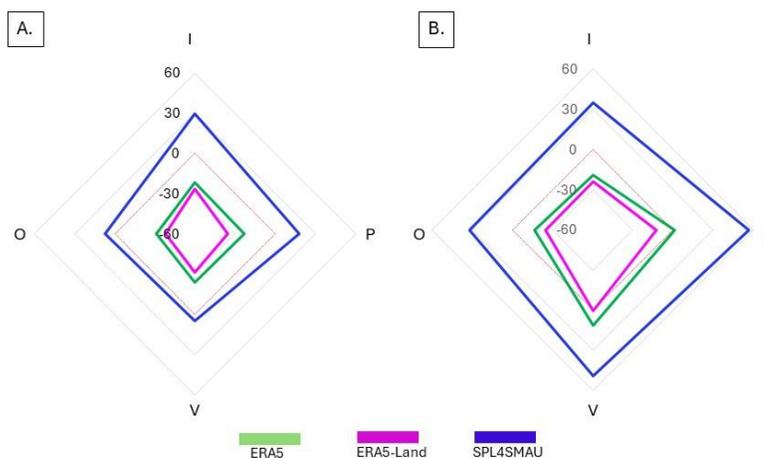


**Figura 12.** Métricas de bondad RZSM horario estacional **A.** *ubRMSE*, **B.** *r* y **C.** *KGE* para RZSM horario estacional. I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño.

Respecto a la correlación (Figura 12.B), la estación de primavera destaca con los valores más altos de correlación promedio para la RZSM (ERA5= 0,74, ERA5-Land= 0,75, SPL4SMAU= 0,74), en contraposición a los valores en otras estaciones, que oscilan entre 0,03 y 0,45, evidenciando las menores correlaciones durante el verano (ERA5= 0,03, ERA5-Land= 0,18 y SPL4SMAU= 0,39). En lo que concierne al *KGE* (Figura 12.C), se observa que los peores desempeños están en la estación de verano (ERA5= -0,43, ERA5-Land= -0,39 y SPL4SMAU= -0,28), indicando un desempeño deficiente. En contraste, para primavera existen mejores desempeños para ERA5 (0,29) y ERA5-Land (0,19), seguido de la estación de invierno (ERA5= 0,16, ERA5-Land= 0,06), mientras que el producto SPL4SMAU mantiene desempeños deficientes en las cuatro estaciones.

Durante la estación invernal, existe una subestimación de la HS para ERA5 y ERA5-Land en ambas profundidades, SSM y RZSM (Figura 13.A y B.), con valores de *PBIAS* de -21,88% y -19,23% para ERA5, y -26,72% y -23,85% para ERA5-Land, respectivamente. Contrariamente, SPL4SMAU muestra una sobreestimación significativa, con *PBIAS* de 29,33% y 34,83% en SSM y RZSM. En primavera, ERA5 presenta un *PBIAS* de -23,26% en SSM y de 1,06% en RZSM, mientras que ERA5-Land muestra -35,49% y -12,43%, reflejando una subestimación más marcada en ambos perfiles durante esta estación. SPL4SMAU presenta una sobreestimación en SSM de 17,8%, y una sobreestimación aún

mayor en RZSM (56,87%). Durante el verano, SPL4SMAU continúa con una alta sobreestimación en RZSM (49,04%), mientras que ERA5 y ERA5-Land muestran menores sobreestimaciones en esta métrica, con 10,98% y 0,30%, respectivamente. Finalmente, en otoño, ERA5 y ERA5-Land tienden a subestimar la HS, con los valores más negativos observados en ERA5-Land (-37,64% en SSM y -24,55% en RZSM), mientras que SPL4SMAU mantiene una sobreestimación moderada con *PBIAS* de 6,88% y 31,63% respectivamente.



**Figura 13.** Desempeño *PBIAS* para **A.** SSM y **B.** RZSM horario estacional. I: Invierno, P: Primavera, V: Verano y O: Otoño.

#### 4.3. Respuesta de la humedad del suelo a diferentes eventos de precipitación

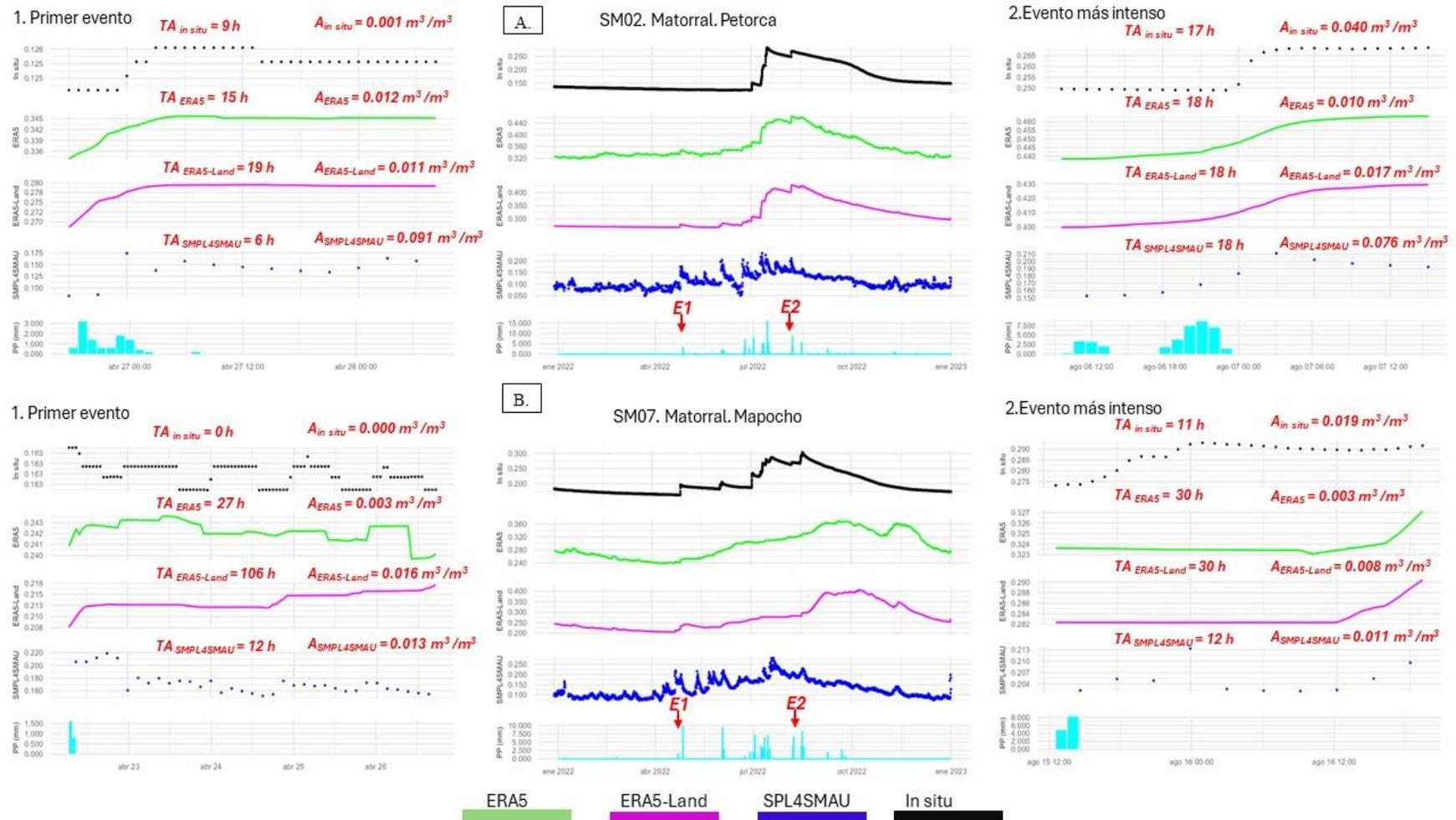
Debido a la disponibilidad de datos, en la presente sección se utilizan 10 sitios de monitoreo de HS, donde la selección y descripción del primer evento de precipitación (E1) y el más intenso (E2) se encuentra en el Apéndice 14. En los sitios de Cauquenes, SM19 (Apéndice 14.6), SM21 (Apéndice 14.7), y SM23 (Apéndice 14.8), son utilizados eventos de precipitación para el año 2021, debido a la disponibilidad de datos de pluviómetros. En la Figura 14 y 15 se muestra un sitio representativo de cada cuenca (en base al porcentaje de cobertura de suelo), donde a la izquierda se encuentra E1, en las gráficas centrales se encuentra la serie temporal horaria de RZSM para el año, y a la derecha el E2. La estimación de las firmas de HS, tiempo de ascenso (TA) y amplitud (A) para todos los sitios se muestran en el Apéndice 15.

En SM02 (matorral de Petorca), el E1 tiene intensidad de 1,04 mm/h y duración de 13 h, el TA *in situ* es de 9 h, mientras que el TA calculado con ERA5 es de 15 h, con ERA5-Land de 19 h, y con SPL4SMAU 6 h. La A *in situ* es de 0,001 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, contrastando con las amplitudes más altas previstas por ERA5, ERA5-Land, y SPL4SMAU, que son 0,012, 0,011, y 0,091 m<sup>3</sup>/m. E2 tiene una intensidad de 3,88 mm/h en 2 h, TA *in situ* es notablemente más largo, con 17 h, y la A *in situ* también aumenta a 0,040 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Los modelos ERA5 y ERA5-Land reflejan un TA de 18 h con amplitudes de 0,010 y 0,017 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, mientras que SPL4SMAU coincide con el TA *in situ*, pero muestra una A considerablemente mayor de 0,076 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

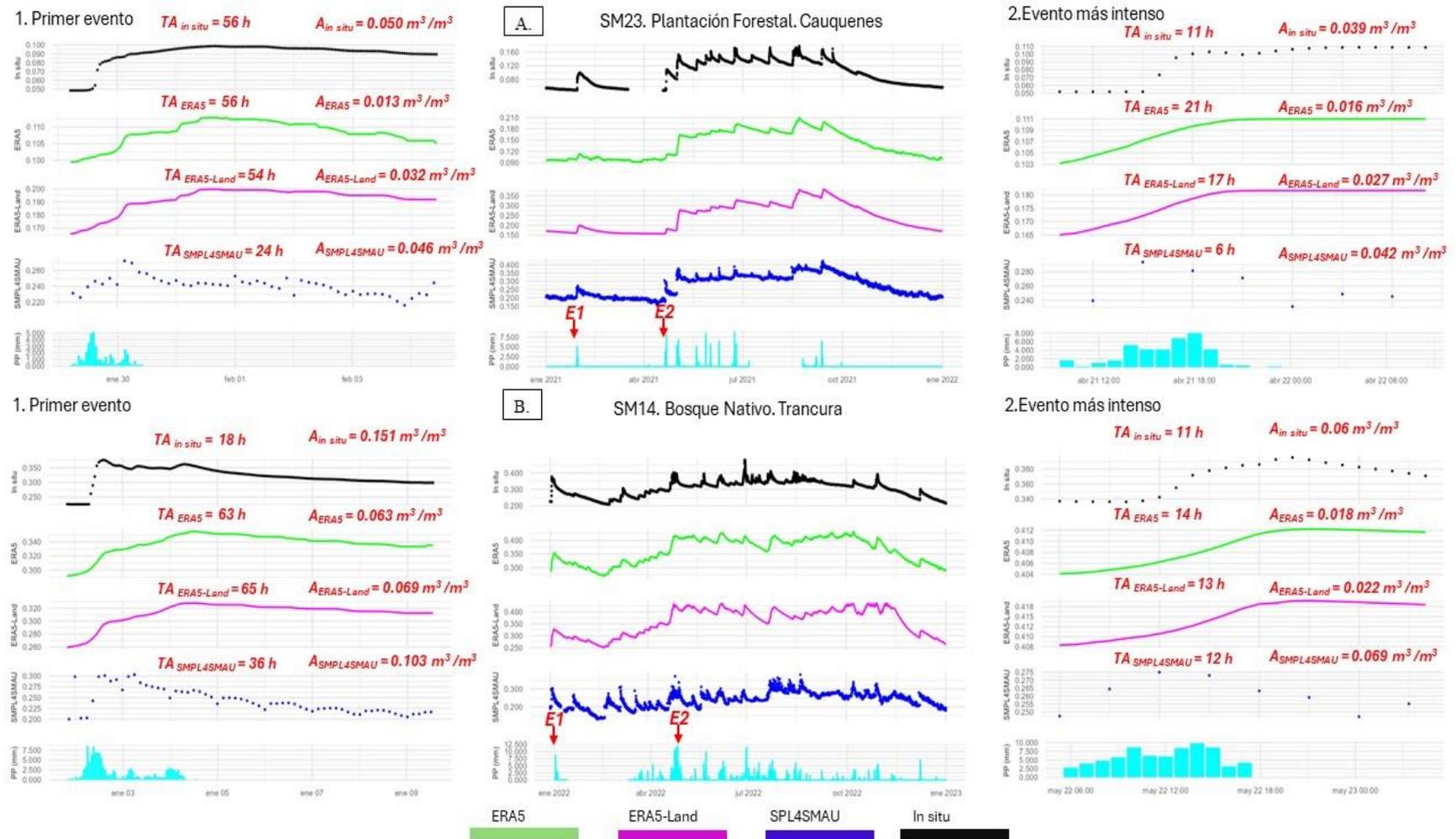
SM07 (matorral de Mapocho), presenta, por un lado, un E1 de 2 h con una intensidad de 1.2 mm/h, el cual no muestra un aumento en la RZSM *in situ* ( $A=0 \text{ m}^3/\text{m}^3$  y  $TA=0 \text{ h}$ ), sugiriendo una respuesta nula del suelo ante el evento de precipitación. Sin embargo, ERA5 estima un TA para este evento de 27 h, ERA5-Land de 106 h, y SPL4SMAU de 12 h, con amplitudes de 0,003, 0,016, y 0,013  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Por otro lado, E2, de 6,5 mm/h y duración 2 h, el TA *in situ* se registra en 11 h y la A *in situ* en 0,019  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , indicando una respuesta de la RZSM. ERA5 y ERA5-Land muestran un TA de 30 h con amplitudes de 0,003 y 0,008  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , mientras que SPL4SMAU tiene un TA de 12 h y una A de 0,011  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .

En el sitio SM23 (plantación forestal de Cauquenes), E1 se extiende por 30 h con una precipitación total de 39,2 mm y una intensidad de 1,3 mm/h, estimando un TA *in situ* de 56 h, coincidiendo con ERA5 (56 h), ERA5-Land (54 h), mientras que SPL4SMAU (24 h) subestima la TA. E2 dura 13 h con una precipitación de 38,2 mm y una intensidad de 2,94 mm/h (Apéndice 14.8), el TA *in situ* es de 11 h y la A *in situ* de 0,039  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Los modelos ERA5 y ERA5-Land muestran un TA de 21 y 17 h con A de 0,016 y 0,027  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . SPL4SMAU registra un TA de 6 h y con una A de 0,042  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .

En SM14 (bosque nativo de Trancura), E1 tiene una duración de 62 h con una precipitación total de 124,2 mm y una intensidad de 2.00 mm/h, estimando *in situ* un TA de 18 h y una A de 0,151  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Los productos grillados ERA5 y ERA5-Land tienen resultados similares, ya que estiman un TA de 14 y 13 h, con amplitudes de 0,063 y 0,069  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . SPL4SMAU indica un TA de 36 h y una A de 0,103  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Mientras que E2 de 12 h y una precipitación de 72,4 mm con una intensidad de 6,0 mm/h, TA *in situ* es de 11 h con una A *in situ* de 0,06  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Comparativamente, los modelos ERA5 y ERA5-Land estiman un TA de 14 y 13 h, con amplitudes de 0,018 y 0,022  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , mientras que SPL4SMAU indica un TA de 12 h y una A de 0,069  $\text{m}^3/\text{m}^3$ .



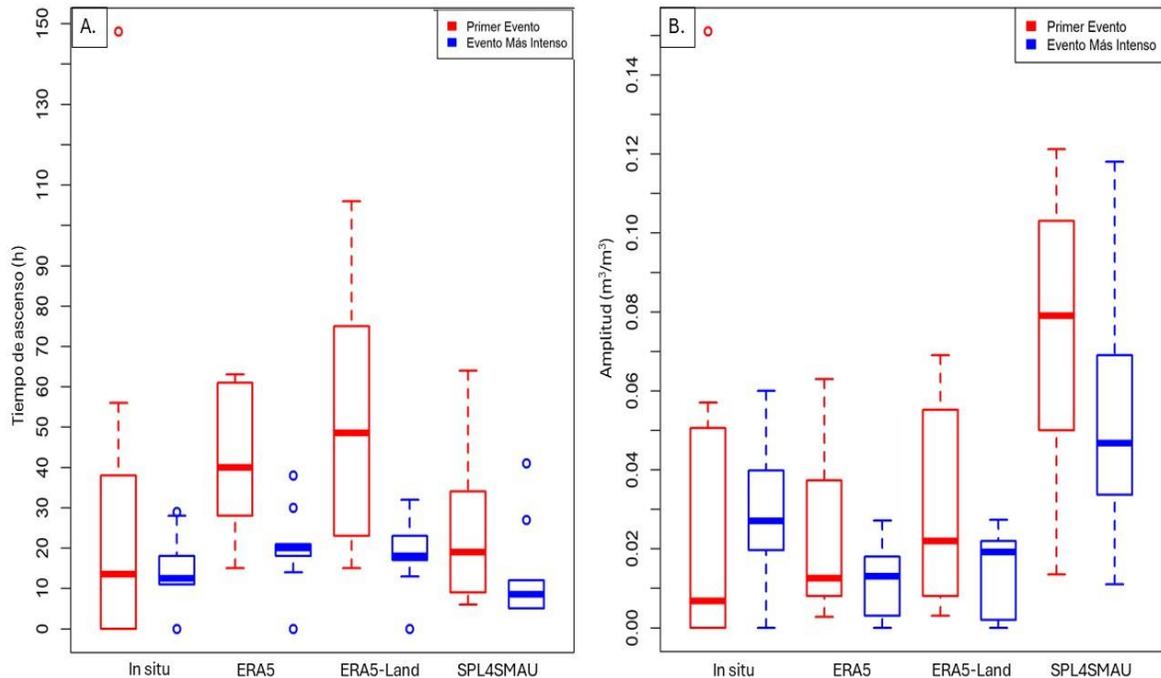
**Figura 14.** Serie de tiempo anual de HS y eventos de precipitación. A la izquierda se presenta el primer evento de precipitación del año (mostrando el TA: Tiempo de ascenso; y A: Amplitud.), al medio, la serie temporal de RZSM y precipitación completa anual, y a la derecha, el evento más intenso del respectivo sitio. Se grafican los sitios de matorral **A.** SM02 y **B.** SM07.



**Figura 15.** Serie de tiempo anual de HS y eventos de precipitación. A la izquierda se presenta el primer evento de precipitación del año (mostrando el TA: Tiempo de ascenso; y A: Amplitud.), al medio, la serie temporal de RZSM y precipitación completa anual, y a la derecha, el evento más intenso del respectivo sitio. Se grafican los sitios de plantación forestal **A.** SM23 y bosque nativo **B.** SM14.

Los TA estimados para todos los sitios se grafican en la Figura 16.A. Generalmente, ERA5 y ERA5-Land tiende a sobreestimar el TA en el E1 (representado en color rojo), registrando medianas de 40 y 48,5 h, respectivamente. En contraste, los datos *in situ* indican una mediana de 17 h, cifra cercana a la reportada por SPL4SMAU (19 h). Para E2 (representado en color azul), se observan similitudes entre los TA, con medianas de 20, 18, 16 y 9 h para los datos *in situ*, ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU, respectivamente.

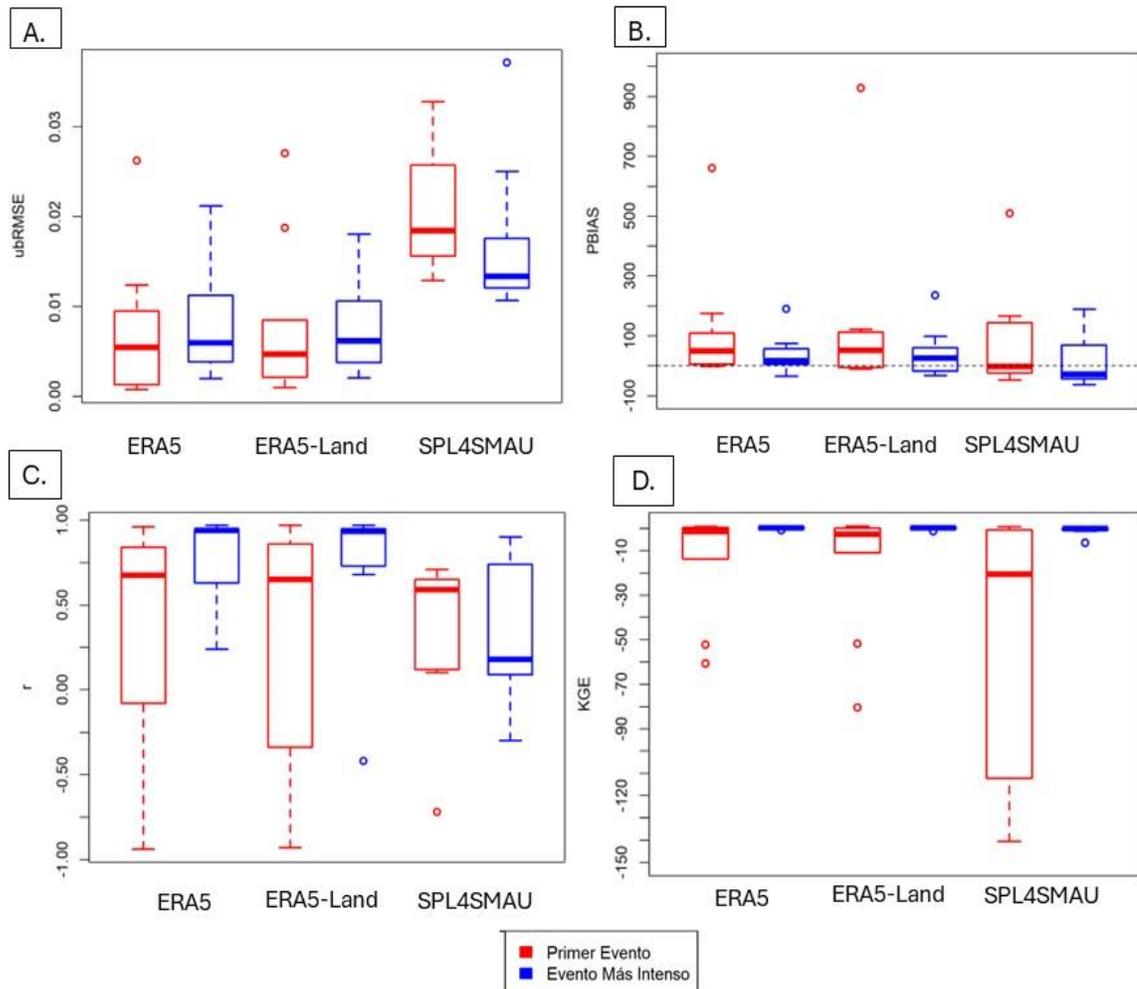
Respecto a la A de la RZSM (Figura 16.B.), ERA5 (mediana de 0,013 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) muestra valores más bajos en el E1 comparado con ERA5-Land (mediana de 0,025 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) y SPL4SMAU (mediana de 0,079 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), según se indica en la Figura 20. Estos valores son superiores a los obtenidos *in situ*, que presentan una mediana de apenas 0,008 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Durante el evento E2, SPL4SMAU reporta la A más alta (mediana de 0,057 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), en contraposición a las A menores detectadas en los otros productos grillados (ERA5 y ERA5-Land con mediana de 0,013 y 0,019 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>). Esto señala que estos dos últimos productos estarían subestimando la amplitud de la RZSM en E2 (sonda *in situ* mediana de 0,029 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), mientras que SPL4SMAU estaría sobrestimando la amplitud de la RZSM.



**Figura 16.** Boxplot de tiempo de ascenso (A.) y amplitud (B.) del primer evento (rojo) y el evento más intenso de precipitación (azul) en un año, utilizando datos derivados de las mediciones *in situ* y estimaciones de productos grillados de HS.

Las métricas de bondad para comparar las curvas de RZSM ante los eventos (Figura 17) exhiben una variedad de resultados cuyos detalles específicos se encuentran en el Apéndice 16. El *ubRMSE* (Figura 17.A) presentó valores más bajos para ERA5 y ERA5-Land en comparación con SPL4SMAU, lo que sugiere un menor error de la RZSM estimada por estos productos, aplicable tanto para el primer evento anual como para el más intenso.

En cuanto al *PBIAS* (Figura 17.B), se detectaron sobreestimaciones y subestimaciones en distintos sitios de monitoreo; generalmente, ERA5 y ERA5-Land tienden a sobreestimar los valores de RZSM para ambos eventos, en contraposición a SPL4SMAU, que tiende a la subestimación. Para el E1 las correlaciones más altas (Figura 17.C.) se observan en ERA5-Land y ERA5, con medianas de 0,69 y 0,68. En contraste, SPL4SMAU muestra correlaciones más bajas, con una mediana de 0,59, pero con valores que no sobrepasan el 0,8 (Apéndice 16), como si ocurren en los otros productos. Para el E2, ERA5-Land y ERA5 presentan correlaciones aún más altas que el primer evento (0,935 y 0,94, respectivamente), mientras que para SPL4SMAU hay una disminución ( $r$  mediana = 0,18) de las correlaciones en comparación con el primer evento, por lo que este producto no entrega una buena representación de la respuesta de la RZSM a eventos intensos de precipitación.



**Figura 17.** Métricas de bondad **A.** *ubRMSE*, **B.** *PBIAS*, **C.**  $r$  y **D.** *KGE* para primer evento (E1) y evento más intenso de precipitación (E2), utilizando datos de RZSM derivados de las mediciones *in situ* y productos grillados de HS.

El *KGE* (Figura 17.D.) muestra variaciones considerables (-141 a 0,87) para los distintos productos grillados, así como entre los distintos eventos de precipitación. Para E1 las medianas *KGE* son -0,44, -2,68 y -20,7 para ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU. ERA5-Land

registra una amplia gama de valores de  $KGE$  (-80,5 a 0,87), mayormente negativos durante el primer evento de precipitación (7 sitios), señalando una discrepancia importante. Estos valores negativos son especialmente marcados en comparación con ERA5 y SPL4SMAU, sugiriendo que ERA5-Land podría tener dificultades en representar correctamente la precipitación durante el primer evento del año. Durante E2, se observa una mejora leve en los valores de  $KGE$  para los productos grillados (medianas de ERA5= 0,06, ERA5-Land= 0,07 y SPL4SMAU= -0,235), aunque los valores siguen siendo predominantemente negativos.

#### 4.4. Propiedades de retención de agua en el suelo

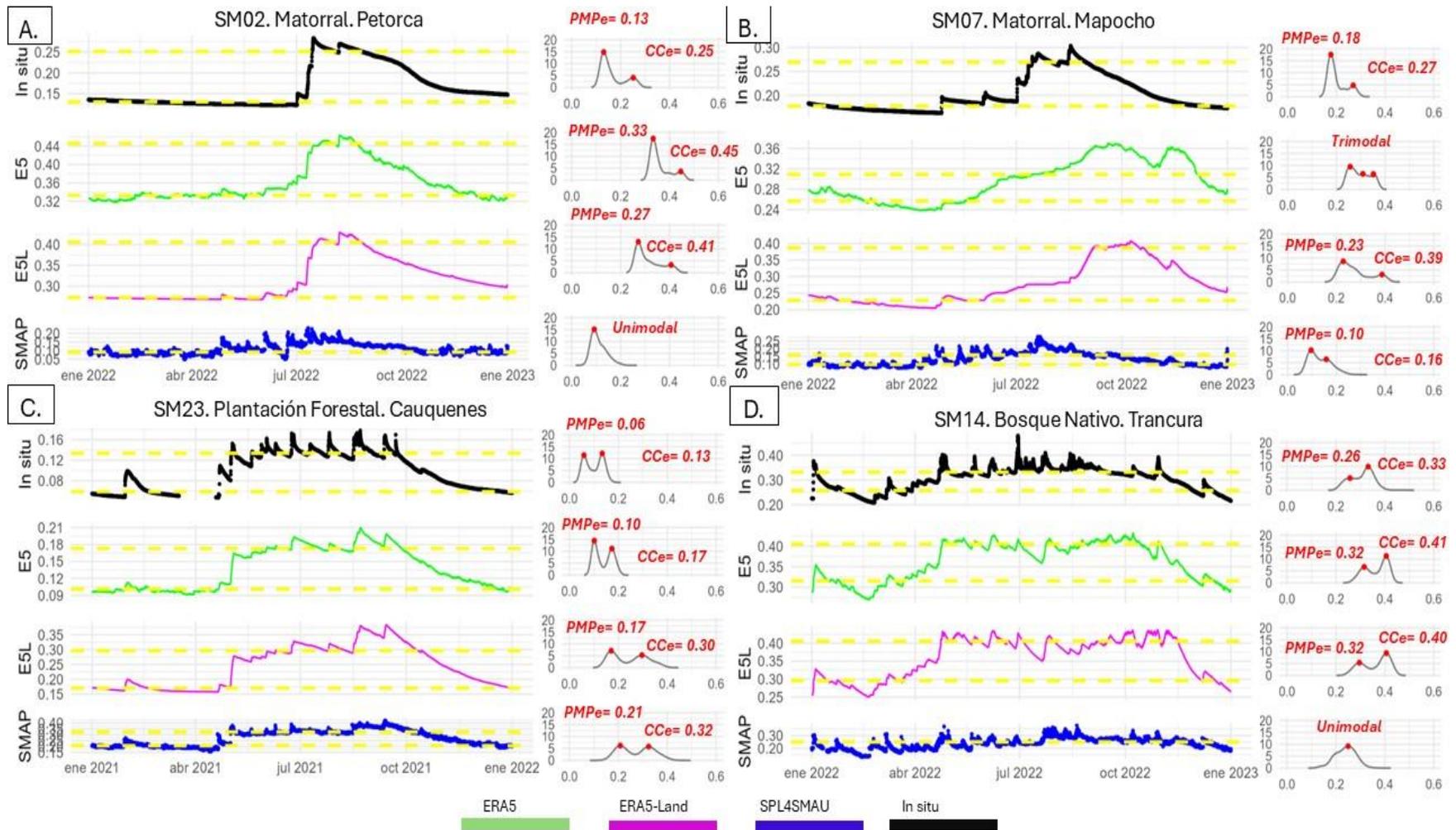
En la presente sección son utilizados 10 sitios de monitoreo de HS, donde la clasificación de las funciones de densidad de probabilidad (FDP) se encuentra en el Apéndice 17.1. La Figura 18 ilustra el análisis de un sitio representativo a cada cuenca de estudio, mostrando la dinámica RZSM en un año y las respectivas FDP para las diferentes fuentes de datos. Se evidencian diferencias importantes en el comportamiento de la series temporales de RZSM, y en la variabilidad de los valores de RZSM en establecidas en FDP.

En el sitio de matorral de Petorca (SM02) se detecta una distribución bimodal (Figura 18 A.) en los datos *in situ* y en los productos ERA5 y ERA5-Land, lo que sugiere una dinámica que cambia entre dos estados preferenciales, caracterizados por condiciones promedio de RZSM secas o húmedas. En oposición, SPL4SMAU muestra una distribución unimodal, impidiendo la detección de las principales características de retención de HS, CCE y PMPe.

En el sitio de matorral de Mapocho (SM07), las FDP derivadas de los datos *in situ* reflejan una respuesta clara a los estados de la RZSM, lo que se traduce en FDP bimodal. ERA5 presenta dificultades en este sentido, con 3 peaks de HS (FDP multimodal). ERA5-Land y SPL4SMAU presentan una distribución bimodal, pero con diferencias en la magnitud de los valores.

La plantación forestal de Cauquenes (SM23) mostró un patrón consistente con una distribución bimodal en la RZSM tanto para las mediciones *in situ* como para las estimaciones de los productos grillados. En los sitios de Cauquenes (Apéndice 17.1) los 3 productos grillados logran retratar el carácter bimodal en las FDP.

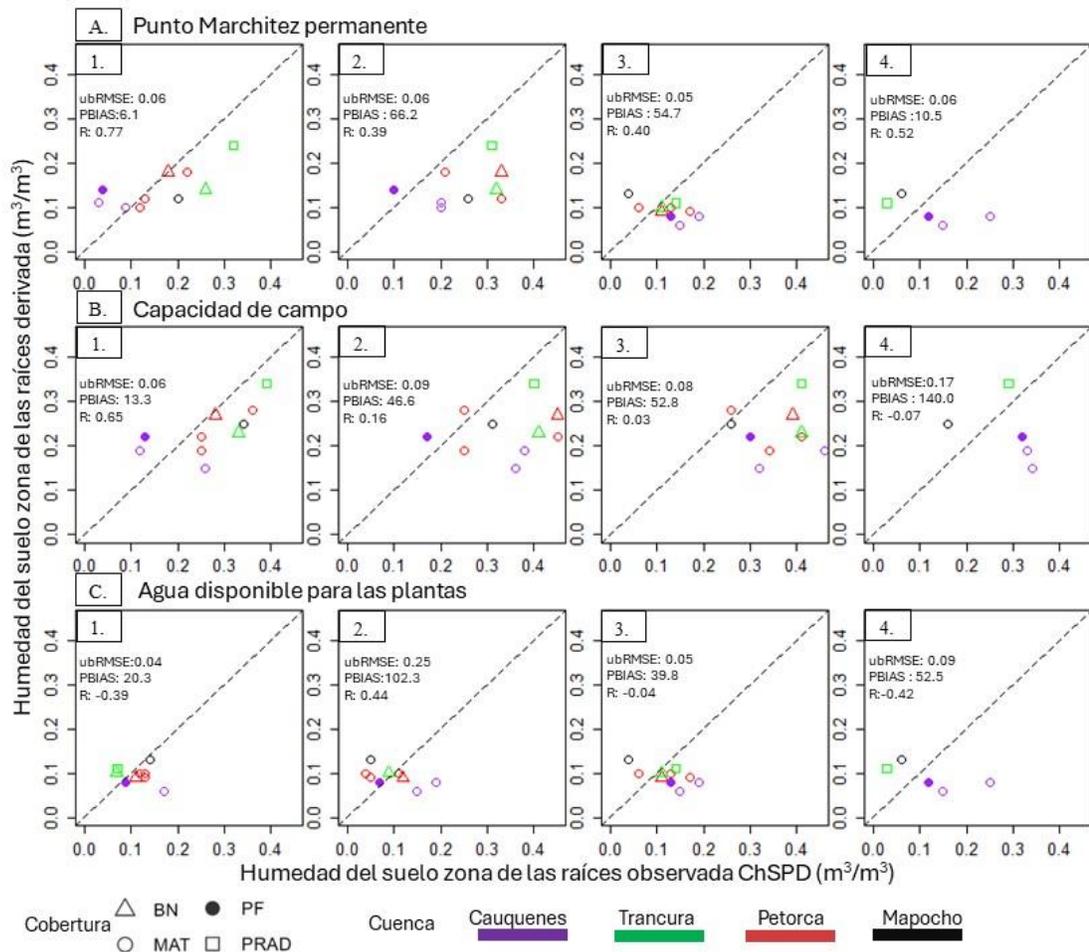
En el sitios de bosque nativo de Trancura (SM14), las series temporales de RZSM muestran una respuesta de la HS diferente a los otros sitios, con FDP que sugieren una capacidad de retención de agua significativamente mayor en el suelo bajo el bosque nativo y con una tendencia a estar por sobre la CCE durante gran parte del año. Aquí, SPL4SMAU tiende a mostrar una distribución unimodal, mientras que ERA5 y ERA5-Land refleja una variabilidad similar a las mediciones *in situ*.



**Figura 18.** Series de tiempo y funciones de densidad de probabilidad de RZSM. En cada sitio graficado se puede ver a la izquierda las series de tiempo y sus respectivas funciones de densidad de probabilidad a la derecha. Las líneas segmentadas amarillas señalan el CCe y el PMPe. Se grafican los sitios de **A. SM02**, **B. SM07**, **C. SM23** y **D. SM14**.

Los valores derivados de las FDP para PMPe, CCE y ADPe (definido como la diferencia entre CCE y PMPe) comparados con los datos ChSPD (Figura 19) revela variaciones en la capacidad de los productos grillados para reproducir adecuadamente estas firmas de HS. En particular, se destaca que SPL4SMAU, al no mostrar una distribución bimodal en todos los sitios, falla en proporcionar estimaciones fiables para PMPe y CCE.

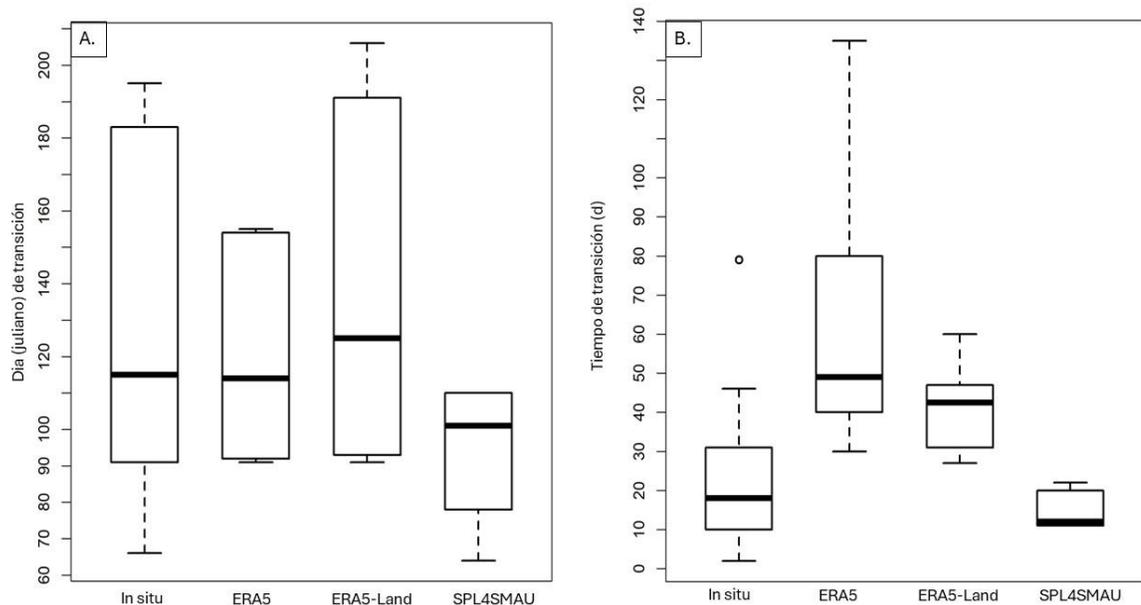
En general, las propiedades de retención de humedad (Apéndice 17) derivadas de las mediciones *in situ* (Figura 19.A.1. B.1. y C.1.) logran representar lo medido en laboratorio, con mejores resultados para el PMPe y CCE con valores altos de  $r$  ( $>0.65$ ) y los valores de  $PBIAS$  ( $< 15\%$ ). Para el PMPe (Figura 19.A.) derivado de las mediciones *in situ* se registra un  $r$  de 0.77 y un  $PBIAS$  de 6.1 %, lo que se contrapone a los valores encontrados en ERA5 (0.39 y 66.2 %) y ERA5-Land (0.40 y 54.7 %). Para el caso de SPL4SMAU, existen un mejor desempeño (0.52 y  $PBIAS$  de 10.5 %), pero solo cinco sitios permiten estimar estas firmas de HS.



**Figura 19.** Estimación **A.** PMPe, **B.** CCE y **C.** ADPe vs ChSPD (Laboratorio). En el eje X se muestran los datos en laboratorio (ChSPD), mientras que en el eje Y se presentan los valores estimados mediante las funciones de densidad de probabilidad **1.** *in situ*, **2.** ERA5, **3.** ERA5-Land y **4.** SPL4SMAU.

La estimación de la fecha de transición (FT) utilizando mediciones *in situ* y estimaciones de productos grillados de HS, revela similitudes importantes (Figura 20.A y Apéndice 18). La mediana de las mediciones *in situ* corresponde al día juliano 115, mientras que ERA5 (111), ERA5-Land (125) y SPL4SMAU (101).

En zonas de matorral como la estación SM19 en Cauquenes (Apéndice 18), las mediciones *in situ* coinciden (91) con la estimación de la FT de ERA5-Land (91), a diferencia de ERA5 (111) y SPL4SMAU (110), respectivamente. En contraste, en la cuenca de Mapocho, la estación SM07 mostró discrepancias importantes, con ERA5 (FDP: Trimodal), ERA5-Land (116) y SPL4SMAU (91) subestimando la fecha real, reportada *in situ* (183). En Petorca, ERA5-Land (191) coincide con las mediciones *in situ* para SM04 (191), mientras que SPL4SMAU no captura la distribución bimodal observada, fallando en representar adecuadamente la FDP y, por ende, sin la capacidad de estimar el PMPe y el CCe. En el sitio de bosque nativo SM14 de la cuenca de Trancura, se registró *in situ* la FT (66), en contraste con las proyecciones de ERA5 (92) y ERA5-Land (93), respectivamente.



**Figura 20.** Boxplot de **A.** Fecha de transición (FT) y **B.** Tiempo de transición (TT) utilizando datos derivados de las mediciones *in situ* y estimaciones de productos grillados de HS.

El tiempo de transición (TT) de PMPe a CCe, ilustrada en la Figura 20.B., revela una diversidad de valores, reflejando la heterogeneidad del suelo y las diferentes respuestas de la vegetación en diversas cuencas y tipos de uso de suelo. El TT mediano de los datos *in situ* se aproxima a los 18 días, lo que evidencia la sobreestimación por parte de ERA5 y ERA5-Land, cuyas medianas se sitúan en 48 y 43 días respectivamente. En particular, en los matorrales de Petorca, las diferencias son notables, registrando tiempos de transición de 12.7, 1.7 y 10.3 días para SM02, SM04 y SM05 *in situ*, en contraste con los rangos de 36.9 a 161.3 días ofrecidos por los productos ERA5 y ERA5-Land.

## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Evaluación de productos grillados de humedad de suelo

En la evaluación de las métricas de bondad de ajuste para los productos grillados de humedad del suelo superficial (SSM) y de la zona radicular (RZSM), se observa variabilidad significativa en el desempeño entre los catorce sitios de estudio (Figura 8 y Figura 9), los cuales dependen de las métricas de bondad de ajuste empleadas, tal y como se ha señalado en otros estudios (Zhang et al., 2019; Gruber et al., 2020; Xu, 2020; Saeedi et al., 2021; Wang et al., 2022). A pesar de estas diferencias, los productos grillados horarios (ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU) logran un buen desempeño global, alcanzando el objetivo de precisión del *ubRMSE* de  $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$  en cuatro sitios para la SSM y en diez sitios para la RZSM, demostrando una precisión destacada. Adicionalmente, los productos exhiben una excelente correlación, con valores superiores a 0.75 en la mayoría de los sitios. ERA5-Land sobresale particularmente, alcanzando una correlación promedio de 0.82 para la SSM y 0.86 para la RZSM. Estos resultados reflejan la robustez y la fiabilidad de ERA5-Land en capturar la dinámica de la humedad del suelo a través de variadas condiciones geográficas y para ambos perfiles de suelo.

Sin embargo, es relevante reconocer como una limitación del presente estudio la diferencia de las profundidades de los sensores. Esta variabilidad puede ser atribuida a diferencias en la generación de los productos grillados y las características específicas del terreno que influyen en los sensores *in situ*. Un ejemplo es la profundidad a la que se mide la SSM *in situ*, ya que puede no alinearse con la profundidad representada por los productos grillados de HS. En este estudio, las mediciones *in situ* superficiales se realizaron mayoritariamente a una profundidad de 10 cm, mientras que los productos ERA5 y ERA5-Land tienen profundidades de 7 cm; y SPL4SMAU, SPL2SMAP\_S y SPL3SMP\_E una profundidad de 5 cms. Estas discrepancias en la profundidad de medición pueden contribuir a errores en la comparación y análisis de los datos de SSM.

Además de las limitaciones en la profundidad, las diferencias en el desempeño pueden atribuirse a factores adicionales, como lo puede ser, por una parte, los algoritmos de recuperación y los datos de entrada utilizados en los productos grillados de modelación. Por ejemplo, los productos ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU integran simulaciones de modelos de superficie terrestre y técnicas de asimilación de datos (Reichle et al., 2020; O'Neill et al., 2021b). Sin embargo, la precisión de los modelos de superficie terrestre depende de varios factores como la estructura del modelo, especificaciones de parámetros, campos iniciales y la calidad de los datos meteorológicos de forzamiento (Reichle et al., 2020; Beck et al., 2021; Wang et al., 2022). Para los productos grillados directos de satélite, como lo es SPL3SMP, parámetros de vegetación, topografía y temperatura superficial, pueden tener mayores impactos en el HS derivado del producto (Peng et al. 2021). Otros estudios señalan que el error aleatorio en la SSM derivado de SPL3SMP aumenta con la interferencia de radiofrecuencia (Wang et al., 2022).

Adicionalmente, cambios en la cobertura terrestre y actividades humanas como el riego y/o operaciones de embalses pueden no ser capturados completamente en la modelación de los productos grillados (Xu, 2020), introduciendo incertidumbres adicionales. En Cauquenes, por ejemplo, donde la diversidad de usos del suelo incluye no solo matorral espinoso y plantaciones forestales, sino también agricultura, áreas urbanas e industriales, los efectos de estas actividades en los recursos hídricos son particularmente notorios. La agricultura es predominante en esta área, con un enfoque significativo en cultivos anuales y perennes, incluidas las plantaciones de viñedos que son fundamentales para la producción de vino, tradicionalmente manejadas por pequeños productores (Ramírez, 2021). Estos cambios de difícil monitoreo, sumado a que las observaciones *in situ* solo son representativas de los pocos metros cuadrados que rodean inmediatamente la estación de observación, mientras que los productos de HS basados en datos de satélite y modelos numéricos proporcionan valores promedio de celdas de cuadrícula que cubren cientos de kilómetros cuadrados, dificulta la comparación del desempeño al estimar la SSM o RZSM. Por ejemplo, una celda de cuadrícula en ERA5 cubre más de 600 km<sup>2</sup>. Esta falta de coincidencia espacial entre los productos de HS y las observaciones *in situ* puede resultar en desviaciones entre el HS derivado del producto grillados y el HS observado *in situ*, especialmente en áreas con gran variabilidad de HS como lo podría ser Cauquenes.

Un aspecto destacado en los resultados (Figura 8) es la presencia de un sesgo positivo en varios sitios para todos los productos grillados, tanto en la SSM como en la RZSM, lo que indica una tendencia general a la sobreestimación de la HS. Los valores extremadamente altos de *PBIAS* (>100 %) observados en sitios como SM19, SM21 y SM23 resaltan un problema de subestimación significativa. En estos sitios, ubicados en la cuenca de Cauquenes, operan instrumentos EnviroSCAN, que, aunque puede retratar las condiciones de HS manera precisa (Caicedo-Rosero et al., 2021), necesita ecuaciones de calibración particulares para cada sitio y para cada profundidad monitoreada (Ramírez, 2021). Este proceso puede ser costoso, tanto por la toma de datos en terreno, como el procesamiento de las muestras en el laboratorio, sobre todo si se considera que se deben tener muestras a lo largo del año, para así captar la variabilidad temporal o la respuesta ante eventos de precipitación (Dobriyal et al., 2012; Farahani et al., 2014). Si bien, en SM21 y SM23, existen datos en terreno que permiten generar curvas de calibración, a la fecha de la realización del presente estudio no se habían podido completar mediciones en la temporada invernal, por lo que puede influir en cómo se retrata la HS por parte del sensor EnviroSCAN. A pesar de los problemas de sesgo, es notable que estos tres sitios con altos valores de *PBIAS* mantienen correlaciones robustas. Esto indica que, aunque los valores absolutos de HS estén mal estimados, la dinámica temporal de la HS es capturada de manera efectiva por los productos grillados. Esta capacidad de representar la variabilidad temporal es vital para aplicaciones donde las tendencias y la variabilidad son más críticas que las mediciones absolutas, como en el modelado climático y meteorológico a largo plazo (Xu et al., 2020; Peng et al., 2021).

Es destacable que, por el momento, los productos de alta resolución (SPL2SMAP\_S) no muestran una mejora clara en el desempeño, en comparación con los productos de escala gruesa cuando se evalúan con mediciones *in situ* de un solo punto, situación similar a lo encontrado Peng et al., (2021) en Gran Bretaña y Xu (2020) en la región de los grandes lagos de Estados Unidos, con mejores desempeños para los productos grillados de escala gruesa SPL4 y SMAPL3. Ante esto el *downscaling* de SSM realizado en la cuenca de Cauquenes

en el presente estudio significa un avance considerable en como retratar espacialmente de mejor manera la HS, aunque este proceso es dependiente de los predictores utilizados (Peng et al., 2017; Peng et al., 2021a; Sishah et al., 2023), donde Liu et al. (2020) y Fuentes et al. (2022) señalan al DEM, LST y precipitación acumulada previa como los predictores más importantes al momento de modelar la SSM. En ese sentido, la dificultad de obtener productos grillados de precipitación o temperatura de escala espacial fina genera un problema al momento de querer realizar un *downscaling* sin utilizar mediciones *in situ*. Esto debido a que los predictores utilizados relacionados con la temperatura (MODIS-LST) y precipitación (CR2MET v2.5-1km), tienen problemas de cobertura temporal y de resolución espacial gruesa (CR2MET v2.5 tiene una resolución espacial real de 5 km).

## 5.2. Variación estacional de productos grillados de humedad de suelo

La interacción entre las condiciones estacionales y la precisión de los productos grillados de HS emerge como un aspecto significativo en el análisis. Los resultados ilustran cómo los patrones estacionales influyen en las métricas de bondad de ajuste de estos productos, evidenciando la complejidad inherente en la estimación precisa de la HS. La inclusión de esta información en el análisis fortalece la comprensión de la dinámica de la HS y ofrece valiosos aportes para mejorar la gestión de recursos hídricos y la predicción climática (Araki et al., 2023).

ERA5 sobresale por su consistencia y precisión en comparación con ERA5-Land y SPL4SMAU (Figura 11 y 12), lo que resalta su utilidad en diversas condiciones ambientales. Sin embargo, las variaciones de *PBIAS* (Figura 13) en ERA5 (y en los otros productos grillados) indican una posible sensibilidad a factores estacionales o regionales, como podrían ser las variaciones estacionales en precipitaciones (Wang et al., 2022), la cobertura de nieve (Dong et al., 2022) o prácticas silvoagropecuarias (Bonilla, Bonomelli y Urrutia, 2002).

Durante el invierno, la cobertura de nieve y las condiciones de suelos saturados o congelados podrían dificultar las estimaciones de HS de ERA5 y ERA5-Land (Saeedi et al., 2021; Wang et al., 2022), como se refleja en sus sesgos negativos considerables (Figura 15). Contrariamente, SPL4SMAU presenta una notable tendencia a la sobreestimación durante esta estación. Sitios como SM07 en Mapocho, que presentan un porcentaje considerable de suelo desnudo (>25% de cobertura), o SM14 en Trancura, que presenta suelo desnudo y también nieve (>20% de cobertura en conjunto) (Apéndice 2), son ejemplos en dónde se podría ver afectado el desempeño estacional. La variabilidad en estas estimaciones puede ser atribuida a las características específicas de cada producto, como los algoritmos de procesamiento y las metodologías de calibración que responden de manera distinta a las señales alteradas por la nieve y la saturación del suelo (CITA).

Estudios como el de Bonilla, Bonomelli y Urrutia (2002) han mostrado diferencias espaciales significativas en la HS en distintas áreas de Chile, pese a similares condiciones de precipitación y temperatura. Esto plantea desafíos adicionales para los productos grillados con resoluciones espaciales gruesas, que pueden no capturar adecuadamente la

heterogeneidad espacial de los patrones de HS a nivel local. De todas maneras, ante la ausencia de estaciones de monitoreo de HS públicas o pertenecientes a la ISMN en el país, la utilización de estos productos grillados gratuitos podría complementar la comprensión de la dinámica de sequías hidrológicas a escalas espaciales y temporales mayores, sobre todo considerando la extensa cobertura temporal de datos de HS (y otras variables) por parte de ERA5 (desde 1940) y ERA5-Land (desde 1950), con un potencial monitoreo y pronóstico estacional de la sequía, con un impacto en temas de disponibilidad de agua, la gestión de recursos hídricos, y la sostenibilidad de los ecosistemas agrícolas.

### 5.3. Respuesta de la humedad del suelo a diferentes eventos de precipitación

El análisis de la respuesta de la HS ante distintos eventos de precipitación en diversos sitios de monitoreo ha revelado que existe una complejidad considerable en la capacidad de los productos grillados para predecir estas respuestas. Por un lado, los eventos de precipitación iniciales del año (E1), especialmente en ecosistemas como bosques nativos, matorrales y plantaciones forestales, proporcionan una oportunidad única para observar cómo se configura la dinámica anual de la HS. Estos fenómenos no solo influyen en aspectos fundamentales como la recarga de acuíferos y la disponibilidad de recursos hídricos para la biota, sino que también establecen condiciones que pueden prevalecer a lo largo del año (Dunkerley, 2019). Por otro lado, los eventos de alta intensidad (E2) representan momentos críticos cuyos efectos pueden ser decisivos, como la recarga acelerada de cuerpos de agua superficiales o el aumento en el riesgo de fenómenos erosivos y pérdida de suelo, lo cual puede alterar significativamente la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Dunkerley, 2019; Araki et al., 2022). Adicionalmente, la variabilidad en la intensidad y duración de estos eventos puede inducir cambios rápidos en las condiciones de HS, afectando así la erosión y las comunidades de plantas y animales, especialmente en ecosistemas áridos donde las respuestas a estas variaciones son particularmente críticas (Gomis-Cebolla et al., 2022).

Las discrepancias observadas entre mediciones *in situ* y las estimaciones de los productos grillados ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU, particularmente en términos de Tiempo de Ascenso (TA) y Amplitud (A) de la RZSM (Figura 14, 15 y 16), pueden tener una explicación en las diferencias en la intensidad, duración y momento del año de los eventos de precipitación seleccionados (Apéndice 14). A modo general, para el primer evento del año existe una sobreestimación del TA en ERA5 (mediana de 40 h) y ERA5-Land (mediana de 48.5 h) versus la medición *in situ* (mediana de 17 h), lo que podría estar explicado por situaciones como la del sitio SM01, SM04 y SM07 (Figura 14). Para estos sitios, en el primer evento del año, no existe una respuesta de la RZSM *in situ* (TA= 0 h y A= 0 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), e incluso se observa una disminución del valor, lo que podría estar explicado a las altas demandas evaporativas (Dai et al, 2022; Sehgal & Mohanty, 2023). En este sentido, las discrepancias para el sitio de matorral en Mapocho (SM07) con los productos grillados fueron notablemente grandes, ya que estos señalaban TA de 27 y 106 h para ERA5 y ERA5-Land, respectivamente.

Las diferencias entre las medianas del TA disminuyen considerablemente para el evento más intenso del año, con medianas de 20, 18, 16 y 9 h para los datos *in situ*, ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU, respectivamente, indicando una similitud en la cantidad de horas en que se llega al máximo de HS. Adicionalmente la A de RZSM, a modo general, es sobreestimada para el primer evento del año y subestimada para el evento más intenso por parte de ERA y ERA5-Land (Figura 16), lo que puede llevar a errores en la predicción de las condiciones de saturación del suelo y, consecuentemente, afectar la planificación en contextos de manejo de desastres naturales como inundaciones. Estudios como el de Dai et al, (2022) señalan que la HS en las capas superficiales es más sensible a los eventos de precipitación que en las capas más profundas, por lo que a futuro se puede integrar al análisis la respuesta de la SSM en particular y no solo considerada en la RZSM. El mismo estudio observó que la HS estaba negativamente relacionada con la biomasa vegetal sobre el suelo durante la temporada de crecimiento, ya que la interceptación del dosel y el consumo de agua por las raíces reducían la recarga de lluvia al suelo, por lo que estas variables también podrían influir en los resultados ante la diversidad de ecosistemas y diferentes especies vegetales de los sitios de estudio.

#### 5.4. Propiedades de retención de agua en el suelo

Los modelos ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU, aunque presentan ciertas discrepancias, brindan una herramienta útil para analizar las dinámicas de retención de agua en el suelo en diversas condiciones ambientales y tipos de cobertura vegetal. Estos productos grillados son esenciales en la investigación hidrológica y su potencialidad para simular algunas propiedades clave como el punto de marchitez permanente estimado (PMPE), la capacidad de campo estimada (CCe) y el agua disponible para las plantas estimado (ADPe), ofrecen un marco para mejoras continuas en la simulación hidrológica.

Un aspecto crítico observado en los datos es la diferencia en la representación de la RZSM entre los diferentes productos. Por ejemplo, en el sitio de matorral en Petorca (SM02), tanto las mediciones *in situ* como los modelos ERA5 y ERA5-Land mostraron una distribución bimodal de RZSM (Figura 18), lo cual refleja la capacidad del suelo para alternar entre condiciones secas o húmedas. Contrariamente, SPL4SMAU exhibe una tendencia hacia una distribución unimodal, situación que se replica en los sitios restantes a excepción de los ubicados en la cuenca de Cauquenes, lo que podría significar una pérdida de información crucial sobre las propiedades de retención de agua y una posible ineficiencia en la aplicación de este producto grillado para la gestión de recursos hídricos en las cuencas restantes.

La comparación de las firmas de HS derivadas de las FDP, PMPe y el CCe, revela otra capa de variabilidad. Mientras que las mediciones *in situ* tienden a replicar con alta precisión los valores de laboratorio, los modelos grillados presentan variaciones apreciables (Figura 18). Esto es particularmente evidente en los valores de correlación y el PBIAS asociados con estas propiedades, donde SPL4SMAU, aunque muestra mejoras en algunos sitios, es debido a la menor cantidad de datos, ya que generalmente falla en representar la distribución bimodal observada (Apéndice 17), evidenciando una brecha en su aplicabilidad para simular la

retención de agua del suelo en diferentes contextos ecológicos y geográficos. Trabajos anteriores de Pablos et al. (2017) y Zhang et al. (2021) han utilizado estos modelos para calcular índices de sequía agronómica utilizando ERA5 y ERA5-Land, pero destacan la ausencia de estudios comparativos para SPL4SMAU, lo que podría indicar su inadecuación para representar las capacidades de retención de agua del suelo en diversas coberturas.

Adicionalmente, la fecha de transición (FT) y el tiempo de transición (TT) (Figura 20) entre el PMPe y el CCe estimada a partir de las mediciones *in situ* y los productos grillados de HS resalta la complejidad inherente a la representación de procesos hidrológicos en diversos usos de suelo y cuencas hidrográficas. Los productos grillados ERA5 y ERA5-Land muestran una tendencia similar de la FT en relación con las mediciones *in situ*, aunque con una ligera sobreestimación por parte de ERA5-Land, indicando un inicio de transición más tardío que las observaciones *in situ*. Esta sobreestimación sugiere una representación inexacta del inicio de este periodo, no pudiendo interpretar cuando existe una mayor contenido de RZSM. En contraste, para los TT, los productos grillados tienden a ofrecer estimaciones que superan significativamente los periodos observados *in situ*, lo que implica que los modelos podrían estar sobrestimando la duración en que el suelo (en la zona de las raíces) llega a su nivel de saturación (CCe). SPL4SMAU, por otro lado, se muestra como más preciso en la estimación de TT, aunque con una menor cantidad de sitios con PMPe y CCe, debido a la dificultad de retratar la bimodalidad en la series temporales de RZSM anuales. Estas divergencias entre las estimaciones de los productos grillados y las mediciones *in situ* de RZSM recalcan la importancia de una calibración y validación detallada de los productos grillados de HS para mejorar la confiabilidad de las aplicaciones prácticas, como la agricultura de precisión y la modelización hidrológica.

### 5.5. Perspectivas futuras productos grillados de humedad del suelo

ERA5 (31 km) se destaca como un producto útil para el análisis de la HS a gran escala, gracias a su cobertura global y resolución temporal horaria. A pesar de tener la resolución espacial más gruesa entre los productos evaluados, ERA5 permite reconstruir datos históricos desde 1940, lo que resulta invaluable para estudios climáticos que requieren comprender patrones geoespaciales a largo plazo. ERA5-Land (9km) mejora la resolución espacial en comparación con ERA5 y posee una resolución temporal horaria. Los datos comienzan desde 1950, y su modelación se limita a la superficie terrestre. Dada su mayor resolución espacial, ERA5-Land se recomienda para estudios más detallados de la HS a nivel local y regional. Cabe recalcar que estos 2 productos grillados permiten retratar la HS en 4 perfiles (0-7, 7-28, 28-100 y 100-289 cms), donde en el presente estudio se comprobó el desempeño del perfil superficial (0-7) y el valor estimado para el RZSM (0-100 cms), por lo que se podría evaluar a futuro hasta la profundidad de 289 cms. Además, mostraron buenos resultados para retratar la respuesta de la HS en la zona de las raíces ante eventos de precipitación y las propiedades de retención de la HS, por lo que su potencialidad es aún mayor ante diversas condiciones edafotopoclimáticas (en el Anexo 3 se presentan resoluciones temporales y espaciales de productos grillados de HS aproximadas para distintos campos de estudio).

SPL4SMAU mostró desempeños variables, pero cumplió con su objetivo de alta precisión (*ubRMSE* de 0.04 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) en algunos sitios, tanto para la SMM y la RZSM, siendo especialmente efectivo en plantaciones forestales. Sin embargo, su rendimiento es menos confiable en zonas de matorral y bosque nativo. SPL3SMP\_E, un producto satelital directo, es útil para estudios preliminares de HS a escalas espaciales regionales y temporales semanales, pero su desempeño puede ser limitado en áreas con cobertura vegetal densa o topografía compleja, además de la limitación de solo retratar la SSM. SPL2SMAP\_S, a pesar de su alta resolución (3km), tuvo el desempeño más bajo en este estudio, además de la dificultad de retratar en el tiempo algunas zonas del centro-sur de Chile debido a la baja cantidad de imágenes.

## 6. CONCLUSIONES

Este estudio representa la primera evaluación exhaustiva de cinco productos grillados de humedad del suelo frente a valores *in situ*, abarcando diversas coberturas de uso de suelo y condiciones climáticas en Chile. Los resultados constituyen una contribución significativa y excepcional al campo de la gestión de recursos naturales, destacando tanto la utilidad como las limitaciones de los productos grillados de humedad del suelo.

Los productos ERA5 y ERA5-Land horarios son efectivos para replicar los patrones generales de la humedad del suelo superficial y de la zona de raíces, aunque exhiben variaciones en la precisión dependiendo de la ubicación geográfica del sitio de medición y la estacionalidad con mejores resultados en primavera. A escala diaria se evidencia una leve mejora del desempeño de estos productos grillados, presentándose además un buen desempeño del producto de observación satelital directa SPL3SMP\_E, lo que no es el caso de SPL2SMAP\_S que mostró importantes inconsistencias. La aplicación del downscaling no mostró mejoras significativas con respecto a los productos originales por lo que sus resultados no son concluyentes.

Las discrepancias evidentes en la exactitud registrada entre los diferentes tipos de coberturas del suelo sugieren que la variabilidad local y las características específicas del sitio son relevantes para la modelización precisa de la humedad del suelo y deben ser consideradas en futuras investigaciones que conciernen la evaluación de los productos grillados de HS.

Con respecto a las firmas de humedad de suelo, ERA5 y ERA5-Land tienden a sobrestimar los tiempos de ascenso en el primer evento de precipitación del año. Esta tendencia a la sobreestimación se reduce en eventos de precipitación más intensos, con tiempos de ascenso más ajustados. En cuanto a la amplitud se identificó que, para el primer evento de precipitación, ERA5, ERA5-Land y SPL4SMAU sobrestiman el cambio de humedad en la zona de raíces. En tanto que, en eventos de precipitación intensa, SPL4SMAU mantienen la tendencia a subestimación, mientras ERA5 y ERA5-Land subestiman la amplitud. Esta capacidad para modelar de manera más precisa la respuesta de HS ante eventos de precipitación intensos puede constituir un avance para la implementación de sistemas de

alerta temprana y para la mejora de las estrategias de manejo de emergencias relacionadas con el clima, como inundaciones y sequías, facilitando respuestas más rápidas y efectivas.

La revisión de las funciones de densidad de probabilidad reveló desafíos adicionales en la representación de los ciclos hídricos por parte de los productos grillados, resaltando que SPL4SMAU no logra capturar la tendencia bimodal de la humedad de suelo en los sitios de Petorca ni Trancura. ERA5 y ERA5-Land muestran capacidad para replicar la bimodalidad observada *in situ*, permitiendo estimar con una precisión aceptable el punto de marchitez permanente, por sobre la capacidad de campo y el agua disponible para las plantas. Existe concordancia en la estimación de la fecha de transición por parte de ERA5 y ERA5-Land, mientras que el tiempo de transición es claramente sobreestimado por parte de los productos grillados, señalando periodos más prolongados entre el paso del punto de marchitez permanente estimado a la capacidad de campo estimada. La coherencia en la estimación de propiedades de retención de agua del suelo a partir de productos grillados abre una ventana valiosa de investigación, dado la dificultad operativa de conocer estas propiedades en grandes escalas espaciales. Estas son esenciales para la conservación y gestión de ecosistemas sobre todo en un contexto de escasez hídrica.

Este trabajo no solo representa un avance en el conocimiento científico, sino que también resalta su aplicabilidad en la mejora de la gestión del agua y en la adaptación al cambio climático. Futuras investigaciones se verán enfrentadas a mejoras continuas de los productos grillados por lo que urge ampliar la base de datos disponibles con los esfuerzos de monitoreo consecuentes., lo cual requerirá una colaboración estrecha entre la comunidad científica y los actores públicos y privados interesados en el estado del suelo.

## 7. LITERATURA CITADA

- Álvarez-Garreton, C., P. A. Mendoza, J. P. Boisier, N. Addor, M. Galleguillos, M. Zambrano-Bigiarini, A. Lara, C. Puelma, G. Cortes, R. Garreaud, J. McPhee, y A. Ayala. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(11):5817-46. doi: 10.5194/hess-22-5817-2018.
- Araki, R., Branger, F., Wickenkamp, I., & McMillan, H. (2022). A signature-based approach to quantify soil moisture dynamics under contrasting land-uses. *Hydrological Processes*, 36(4), e14553. <https://doi.org/10.1002/hyp.14553>
- Araki, R., Mu, Y., & McMillan, H. (2023). Evaluation of GLDAS soil moisture seasonality in arid climates. *Hydrological Sciences Journal*, 68(5), 1109–1126. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2206032>
- Beck, E., Ming P., Miralles, D., Reichle, R., Hahn, S., Sheffield, J., Karthikeyan, L., Balsamo, G., Kimball, J., Vergopolan, N. and Wood, E. (2021). Evaluation of 18 Satellite- and Model-Based Soil Moisture Products Using *in situ* Measurements from

- 826 Sensors. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(1):17-40. doi: 10.5194/hess-25-17-2021.
- Beck, H.E., N.E. Zimmermann, T.R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, and E.F. Wood. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data* 5(1):1-12. doi: 10.1038/sdata.2018.214
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., et al. (2021) The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Q J R Meteorol Soc*, 147(741): 4186– 4227: [doi: 10.1002/qj.4174](https://doi.org/10.1002/qj.4174)
- Branger, F., & McMillan, H. K. (2019). Deriving hydrological signatures from soil moisture data. *Hydrological Processes*, 34(6), 1410–1427. <https://doi.org/10.1002/hyp.13645>
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., L., Borga, M., Matgen, P., & Martínez-Fernández, J. (2015). Rainfall estimation from *in situ* soil moisture observations at several sites in Europe: An evaluation of the SM2RAIN algorithm. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*.
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S. and Tarpanelli, A. (2017). Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water* 9(2). doi: 10.3390/w9020140.
- Böhner, J., McCloy, K. R., & Strobl, J. (Eds.). (2006). *SAGA - Analysis and Modelling Applications*. Göttinger Geographische Abhandlungen, 115, 130pp.
- Boisier, J., R. Rondanelli, S. Garreaud., and F. Muñoz. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile.
- Bown, H.E., Fuentes, J.P. & Martínez, A.M. (2018). Assessing water use and soil water balance of planted native tree species under strong water limitations in Northern Chile. *New Forests* 49, 871–892, <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9689-6>
- Caicedo-Rosero, L. C., Méndez-Ávila, F. de J., Gutiérrez-Zeferino, E., & Flores-Cuautle, J. de J. A. (2021). Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(17), 1-8. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>
- Chen, F., Crow, W. T., Bindlish, R., Colliander, A., Burgin, M. S., Asanuma, J., and Aida, K. (2018). Global-scale evaluation of SMAP, SMOS and ASCAT soil moisture products using triple collocation, *Remote Sens. Environ.*, 214, 1–13p.
- Corradini, C. (2014). Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales. *Journal of Hydrology*, 516, 1–5p.

- Das, N., D. Entekhabi, S. Dunbar, J. Chaubell, A. Colliander, S. Yueh, T. Jagdhuber, F. Chen, W. T. Crow, P. E. O'Neill, J. Walker, A. Berg, D. Bosch, T. Caldwell, M. Cosh, C. H. Collins, E. LopezBaeza, and M. Thibeault. (2019). The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high-resolution surface soil moisture product, *Remote Sensing of Environment*, 233, 111380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111380>
- Das, N., D. Entekhabi, R. S. Dunbar, S. Kim, S. Yueh, A. Colliander, P. E. O'Neill, T. Jackson, T. Jagdhuber, F. Chen, W. T. Crow, J. Walker, A. Berg, D. Bosch, T. Caldwell, and M. Cosh. (2020). SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 3. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/ASB0EQO2LYJV>.
- Dinamarca, D. I., Galleguillos, M., Seguel, O., et al. (2023). CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data*, 10(630). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>
- DGA (Dirección General de Aguas), Chile. (2013). Actualización informe evaluación de los recursos hídricos superficiales de las cuencas del río Petorca y río La Ligua, Región de Valparaíso. DGA. Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Recuperado en: <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/32936>
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458–459, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>
- Dong, X., Lai, X., Wang, Y., Dong, W., Zhu, J., Dong, L., & Cen, S. (2022). Applicability evaluation of multiple sets of soil moisture data on the Tibetan Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.872413>
- Doran, J. W., & T. B. Parkin. (1994). Defining and Assessing Soil Quality. Pp. 1-21 en *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Dorigo, W., Himmelbauer, I., Aberer, D., Schremmer, L., Petrakovic, I., Zappa, L., Preimesberger, W., Xaver, A., Annor, F., Ardö, J., Baldocchi, D., Blöschl, G., Bogena, H., Brocca, L., Calvet, J.-C., Camarero, J., Capello, G., Choi, M., Cosh, M., & Sabia, R. (2021). The International Soil Moisture Network: Serving Earth system science for over a decade.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Arias, P. A., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Khan, A., Pokam Mba, W., Rosenfeld, D., Tierney, J., & Zolina, O. (2021). Water Cycle Changes. En *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

(pp. 1055–1210). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.010>

- Dunkerley, D. L. (2019). Rainfall intensity bursts and the erosion of soils: an analysis highlighting the need for high temporal resolution rainfall data for research under current and future climates, *Earth Surf. Dynam.*, 7, 345–360, <https://doi.org/10.5194/esurf-7-345-2019>.
- Entekhabi, D. E., P. Njoku, T. O'Neill, J. Jackson, J. Thomas, J. Entin and Eastwood I. (2010). The Soil Moisture Active/Passive Mission (SMAP).
- Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. (2014). Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review. *Sensors*, 14(5), 7881-7939. <https://doi.org/10.3390/s140507881>
- Fischer, B., Smith, M. & Pau, G. (2021). rhdf5: R Interface to HDF5. R package version 2.38.0. <https://github.com/grimbough/rhdf5>
- Galleguillos, M., Gimeno, F., Puelma, C., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., & Rojas, M. (2021). Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations.
- Gomis-Cebolla, J., Garcia-Arias, A., Perpinyà-Vallès, M. y Francés, F. (2022). «Evaluation of Sentinel-1, SMAP and SMOS surface soil moisture products for distributed eco-hydrological modelling in Mediterranean forest basins». *Journal of Hydrology* 608:127569. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127569.
- Gupta, H. V., Perrin, C., Blöschl, G., Montanari, A., Kumar, R., Clark, M., & Andréassian, V. (2014). Large-sample hydrology: a need to balance depth with breadth. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 463–477. doi:10.5194/hess-18-463-2014
- Gruber, A., & Scanlon, T. (2019). Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. 23p.
- Han, Q., Zeng, Y., Zhang, L. et al. Global long term daily 1 km surface soil moisture dataset with physics informed machine learning. *Sci Data* 10, 101 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02011-7>
- Hijmans, R. (2022). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-15. <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Hijmans, R. (2021). geosphere: Spherical Trigonometry. R package version 1.5-14. <https://CRAN.R-project.org/package=geosphere>
- Indoria, A. K., K. L. Sharma, & K. S. Reddy. 2020. Chapter 18 - Hydraulic properties of soil under warming climate. Pp. 473-508 en *Climate Change and Soil Interactions*, editado por M. N. V. Prasad y M. Pietrzykowski. Elsevier.

- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424-425:264 – 277.
- Jin, Y., Ge, Y., Wang, J., Chen, Y., Heuvelink, G. B. M., & Atkinson, P. M. (2018). Downscaling AMSR-2 soil moisture data with geographically weighted area-to-area regression kriging. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(4), 2362-2376. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2778420>
- Joseph, M., Oakley, M. & Schira, Z. (2019). smapr: Acquisition and Processing of NASA Soil Moisture Active-Passive (SMAP) Data. R package version 0.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=smapr>
- Kerr, Y.H., P. Waldteufel, P. Richaume, J.P. Wigneron, P. Ferrazzoli, A. Mahmoodi et al. (2012). The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm. *Proc. IEEE*. 50(5):1384-1403p.
- Kerr, Y. H., J. P. Wigneron, A. Al Bitar, A. Mialon, y P. K. Srivastava. 2016. «Chapter 1 - Soil Moisture from Space: Techniques and Limitations». Pp. 3-27 en *Satellite Soil Moisture Retrieval*, editado por Prashant K. Srivastava, G. P. Petropoulos, y Yann H. Kerr. Elsevier.
- Lai, E. N., Wang-Erlandsson, L., Virkki, V., Porkka, M., & van der Ent, R. J. (2023). Root zone soil moisture in over 25% of global land permanently beyond pre-industrial variability as early as 2050 without climate policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(10), 3999–4018. <https://doi.org/10.5194/hess-27-3999-2023>
- Ling, X., Huang, Y., Guo, W., Wang, Y., Chen, C., Qiu, B., Ge, J., Qin, K., Xue, Y., and Peng, J. 2021 Comprehensive evaluation of satellite-based and reanalysis soil moisture products using *in situ* observations over China, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 4209–4229p.
- Luebert, F. y P. Plischoff. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile*. 1ra ed. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 316p.
- Mattar, C., A. Santamaría-Artigas, C. Durán-Alarcón, L. Olivera-Guerra, R. Fuster y D. Borvarán. (2016a). The LAB-net soil moisture network: application to termal remote Sensing and Surface energy balance.
- Mattar, C.; A. Santamaría-Artigas y Sobrino, J. A. (2016b). Soil Moisture Retrieved from a Combined Optical and Passive Microwave Approach: Theory and Applications. (cap 7, pp.135-158). En: Srivastava, P. K.; Petropoulos, G. y Kerr, Y. H. *Satellite Soil Moisture Retrieval*. Elsevier. 411p.
- McMillan, H., Coxon, G., Araki, R., Salwey, S., Kelleher, C., Zheng, Y., Knobon, W., Gnann, S., Seibert, J., & Bolotin, L. (2023). When good signatures go bad: Applying

hydrologic signatures in large sample studies. *Hydrological Processes*, 37(9), e14987.  
<https://doi-org.uchile.idm.oclc.org/10.1002/hyp.14987>

- Mohseni, F., Ahrari, A., Haunert, J. H., & Montzka, C. (2024). The synergies of SMAP enhanced and MODIS products in a random forest regression for estimating 1 km soil moisture over Africa using Google Earth Engine. *Big Earth Data*, 8(1), 33–57.  
<https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2257905>
- Molero, B., Merlin, O., Malbeteau, Y., Bitar, A. A., Cabot, F., Cabot, F., Cabot, F., Stefan, V., Stefan, V.-G., Kerr, Y., Kerr, Y. H., Kerr, Y. H., Bacon, S., Cosh, M. H., Bindlish, R., & Jackson, T. J. (2016). SMOS disaggregated soil moisture product at 1 km resolution: Processor overview and first validation results. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.045>
- Moon, S., & Ha, K.-J. (2019). Early Indian Summer Monsoon Onset Driven by Low Soil Moisture in the Iranian Desert. *Geophysical Research Letters*, 46, 10568-10577.  
<https://doi.org/10.1029/2019GL084520>
- Mousa, B. G. & Shu, S. 2020. «Spatial Evaluation and Assimilation of SMAP, SMOS, and ASCAT Satellite Soil Moisture Products Over Africa Using Statistical Techniques». *Earth and Space Science* 7. doi: 10.1029/2019EA000841.
- Ojha, N., Merlin, O., Molero, B., Suere, C., Olivera-Guerra, L., Ait Hssaine, B., Amazirh, A., Al Bitar, A., Escorihuela, M. J., & Er-Raki, S. (2019). Stepwise Disaggregation of SMAP Soil Moisture at 100 m Resolution Using Landsat-7/8 Data and a Varying Intermediate Resolution. *Remote Sensing*, 11, 1863.
- Olivares, C. (2016). Validación de la humedad del suelo estimada mediante un método óptico microondas pasivo en dos zonas agrícolas de distinto régimen hídrico.
- O'Neill, P. E., S. Chan, E. G. Njoku, T. Jackson, R. Bindlish, J. Chaubell, and A. Colliander. (2021a). SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 5. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.  
<https://doi.org/10.5067/4DQ54OUIJ9DL>.
- O'Neill, P., Chan, S., Njoku, E. G., Jackson, T., Bindlish, R., Chaubell, J., y Colliander, A. (2021b). SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 5. NASA National Snow and Ice Data Center. doi: 10.5067/4DQ54OUIJ9DL.
- Pablos, M., Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., & González-Zamora, Á. (2017). Temporal and spatial comparison of agricultural drought indices from moderate resolution satellite soil moisture data over Northwest Spain. *Remote Sensing*, 9(11), 1168.  
<https://doi.org/10.3390/rs9111168>

- Peng, J., Loew, A., Merlin, O. and Verhoest, N. (2017). A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*.
- Peng, J., Clement Albergel, Anna Balenzano, Luca Brocca, Oliver Cartus, Michael H. Cosh, et al. (2021a). «A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements». *Remote Sensing of Environment* 252:112162. doi: 10.1016/j.rse.2020.112162.
- Peng, J., Tanguy, M., Robinson, E. L., Pinnington, E., Evans, J., Ellis, R., Dadson, S. (2021b). Estimation and evaluation of high-resolution soil moisture from merged model and Earth observation data in the Great Britain. *Remote Sensing of Environment*, 264. doi: 10.1016/j.rse.2021.112610
- Petropoulos, G. P., G. Ireland, y B. Barrett. (2015). «Surface soil moisture retrievals from remote sensing: Current status, products & future trends». *Emerging science and applications with microwave remote sensing data* 83-84:36-56. doi: 10.1016/j.pce.2015.02.009.
- Pierce, D. (2021). ncd4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. R package version 1.19. <https://CRAN.R-project.org/package=ncdf4>
- Piles, M. 2010. Multiscale soil moisture retrievals from microwave remote sensing observations. Ph. D. Tesis en Sensores Remotos, Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Barcelona, España. 159 p. doi:10.1016/j.earscirev.2021.103673.
- QGIS.org. (2021). QGIS Geographic Information System. QGIS Association.
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramírez, E. (2021). Efecto del reemplazo del matorral nativo por plantaciones de pino en la evapotranspiración real y percolación para el periodo histórico y futuro en la cuenca del río Cauquenes. Tesis Magíster. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.
- Reichle, R.H., De Lannoy, G., Koster, R.D., Crow, W.T., Kimball, J.S., Liu, Q., y Bechtold, M. (2022). SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: 10.5067/LWJ6TF5SZRG3.
- Reichle, R., Lucchesi, R. A., Ardizzone, J.V., Gi-Kong, K., Smith, E. B., y Weiss, B.H. (2022). Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission Level 4 Surface and Root Zone Soil Moisture (L4\_SM) Product Specification Document. 10 (Version 1.6), p. 84. NASA Goddard Space Flight Center. Recuperado de: <https://nsidc.org/sites/default/files/documents/technical-reference/reichle1438.pdf>

- Saeedi, M., Sharafati, A. & Tavakol, A. (2021). Evaluation of gridded soil moisture products over varied land covers, climates, and soil textures using *in situ* measurements: A case study of Lake Urmia Basin. *Theor Appl Climatol* 145, 1053–1074p.
- Samaniego L., Stephan Thober, Rohini Kumar, Niko Wanders, Oldrich Rakovec, Ming Pan, Matthias Zink, Justin Sheffield, Eric F. Wood, & Andreas Marx. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*.
- Samuel, J., Sivapalan, M., & Struthers, I. (2008). Diagnostic analysis of water balance variability: A comparative modeling study of catchments in Perth, Newcastle, and Darwin, Australia. *Water Resources Research*, 44(6), W06403. <https://doi.org/10.1029/2007WR006694>
- Santamaría-Artigas, A., C. Mattar & J.P. Wigneron. (2016). Application of a combined optical-passive microwave method to retrieve soil moisture at regional scale over Chile: Sensitivity to land cover types. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(4):1939-1504p.
- Sehgal, V., & Mohanty, B. P. (2023). Preferential hydrologic states and tipping characteristics of global surface soil moisture. *ESS Open Archive*. March 09, 2023.
- Seguel, O., Galleguillos, M., Dinamarca, D., Pfeiffer, M., Pérez-Quezada, J., Zambrano-Bigiarini, M., Zamorano, C., & Fustos, I. (2023). ChSPD Chilean soil profile database V1 [Conjunto de datos]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7846566>
- Sishah S., Abraham T., Azene G., Dessalew A., Hundera H. (2023). Downscaling and validating SMAP soil moisture using a machine learning algorithm over the Awash River basin, Ethiopia. *PLoS ONE* 18(1): e0279895. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279895>
- Smith, A., Walker, J., Western, A., Young, R., Ellett, K., Pipunic, R., Grayson, R., Siriwardena, L., Chiew, F., and Richter, H. (2012). The Murrumbidgee Soil Moisture Monitoring Network data set, *Water Resour. Res.*, 48, W07701, <https://doi.org/10.1029/2012WR011976>.
- Song, P., Huang, J., & Mansaray, L. R. (2019). An improved surface soil moisture downscaling approach over cloudy areas based on geographically weighted regression. *Agricultural and Forest Meteorology*, 275, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.022>
- Uribe, D. (2016). Impacto de la vegetación en la estimación de la humedad de superficie utilizando un método óptico microondas pasivo en Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile.

- Warner, D., M. Guevara, J. Callahan, & Vargas, R. (2021). Downscaling satellite soil moisture for landscape applications: A case study in Delaware, USA. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 38:100946. doi: 10.1016/j.ejrh.2021.100946.
- Xu, X. (2020). Evaluation of SMAP Level 2, 3, and 4 Soil Moisture Datasets over the Great Lakes Region. *Remote Sensing* 12(22). doi: 10.3390/rs12223785.
- Yapo, P. O.; Gupta, H. V.; Sorooshian S. (1996). Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*. v181 i1-4. 23–48. doi:10.1016/00221694(95)02918-4
- Zacharias, S., Bogen, H., Samaniego, L., Mauder, M., Fuß, R., Pütz, T., Frenzel, M., Schwank, M., Baessler, C., Butterbach-Bahl, K., Bens, O., Borg, E., Brauer, A., Dietrich, P., Hajsek, I., Helle, G., Kiese, R., Kunstmann, H., Klotz, S., and Vereecken, H. (2011), A Network of Terrestrial Environmental Observatories in Germany, *Vadose Zone J.*, 10, 955–973, <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0139>.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020) hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series R package version 0.4-0. URL <https://github.com/hzambran/hydroGOF>. doi:10.5281/zenodo.839854.
- Zhang, R., Li, L., Zhang, Y., Huang, F., Li, J., Liu, W., Mao, T., Xiong, Z., & Shanguan, W. (2021). Assessment of agricultural drought using soil water deficit index based on ERA5-Land soil moisture data in four southern provinces of China. *Agriculture*, 11(5), 411. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050411>
- Zheng, C., Jia, L., & Zhao, T. (2023). A 21-year dataset (2000–2020) of gap-free global daily surface soil moisture at 1-km grid resolution. *Sci Data*, 10, 139. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01991-w>

## 8. APÉNDICES

### Apéndice 1. Caracterización cuencas de estudio

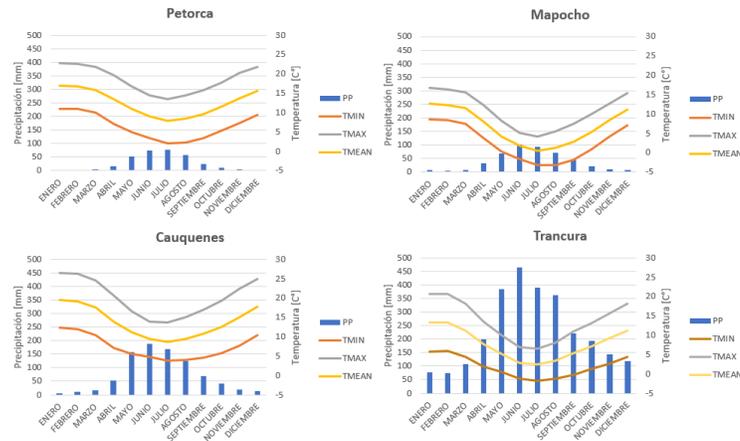
La cuenca del río Petorca en Longatoma posee una superficie aproximada de 1.986 km<sup>2</sup> con elevaciones que van desde 9 a 3.721 msnm. La precipitación acumulada anual de la cuenca es del orden de los 300 mm, donde la mayor cantidad de precipitaciones se concentran en los meses de junio y julio, con precipitaciones mensuales que no superan los 80 mm (Figura 2). Existen 5 sitios de monitoreo de HS que representan ecosistemas de bosque nativo (1), y matorral (3) los cuales son descritos en el Apéndice 1.1.

La cuenca del río Mapocho en Los Almendros posee una superficie de 637 km<sup>2</sup> con elevaciones que van desde 800 a los 5.431 msnm. La precipitaciones acumuladas tienen una

media anual de 501 mm, teniendo una mayor magnitud en los meses de mayo, junio, julio y agosto (Figura 2). Existen 4 sitios de monitoreo de HS, que representan ecosistemas de bosque nativo (1) y matorral (3) los cuales son descritos en el Apéndice 1.2.

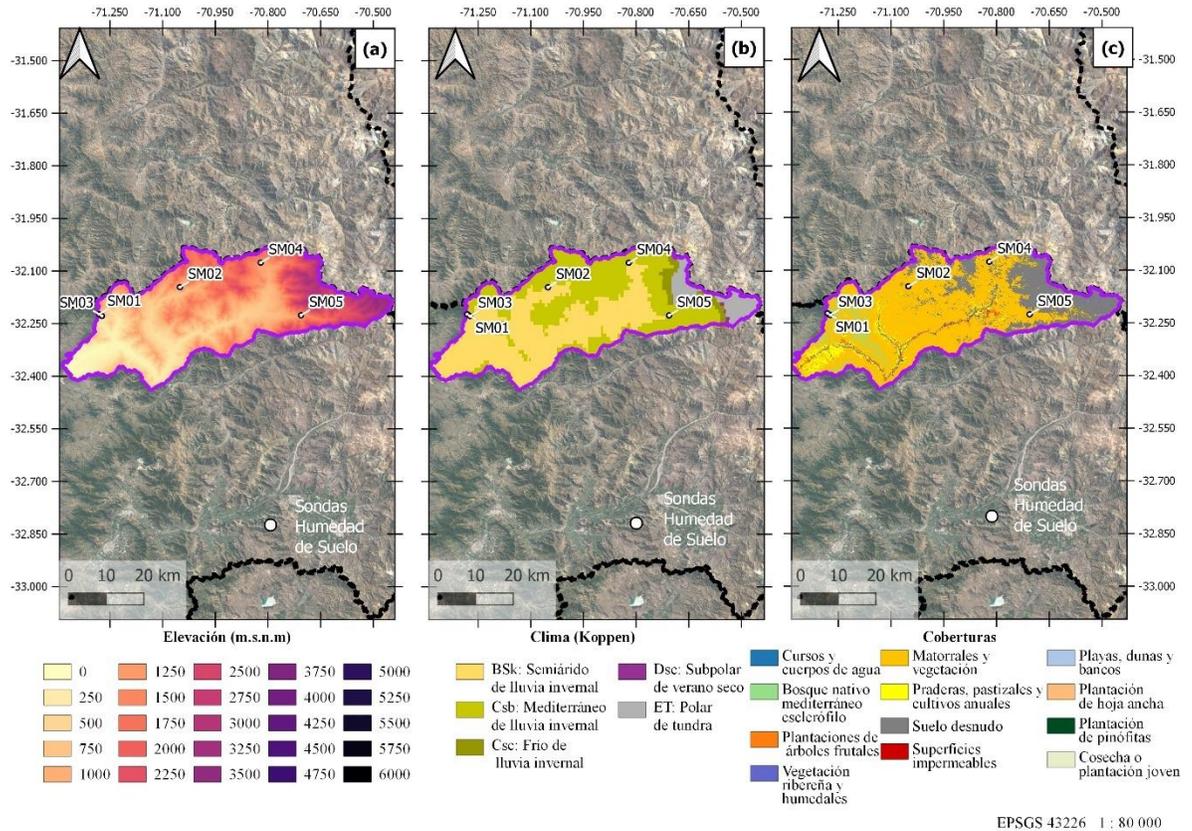
La cuenca del río Cauquenes en Desembocadura posee una superficie de 1.620 km<sup>2</sup> con elevaciones que van desde 7 a 708 msnm. La precipitación media anual ronda entre los 640 mm a 1.100 mm, donde un 80% de las precipitaciones se concentran entre los meses de marzo y agosto; y el restante entre septiembre a noviembre (Galleguillos et al., 2021). La temperatura media anual es de 14,7 °C (Galleguillos et al., 2021). Existen 16 sitios de monitoreo de HS, que representan ecosistemas de bosque nativo (6), plantación forestal (5), matorral (3) y agricultura (2) los cuales son descritos en el Apéndice 1.3.

La cuenca del río Trancura Antes del Río Llafenco posee una superficie de 1.379,4 km<sup>2</sup> y elevaciones que van desde 701 a 3800 msnm. Su precipitación media anual es de 2.583 mm con valores mayores a 70 mm en todos los meses y concentrando valores sobre 150 mm en los meses de junio y julio (Figura 2). Existen 5 sitios de monitoreo de HS, que representan ecosistemas de bosque nativo (4) y pradera (1) los cuales son descritos en el Apéndice 1.4.



**Figura.** Climogramas cuencas de estudio

## Apéndice 1.1. Descripción sitios de monitoreo de HS. Cuenca Petorca en Longatoma

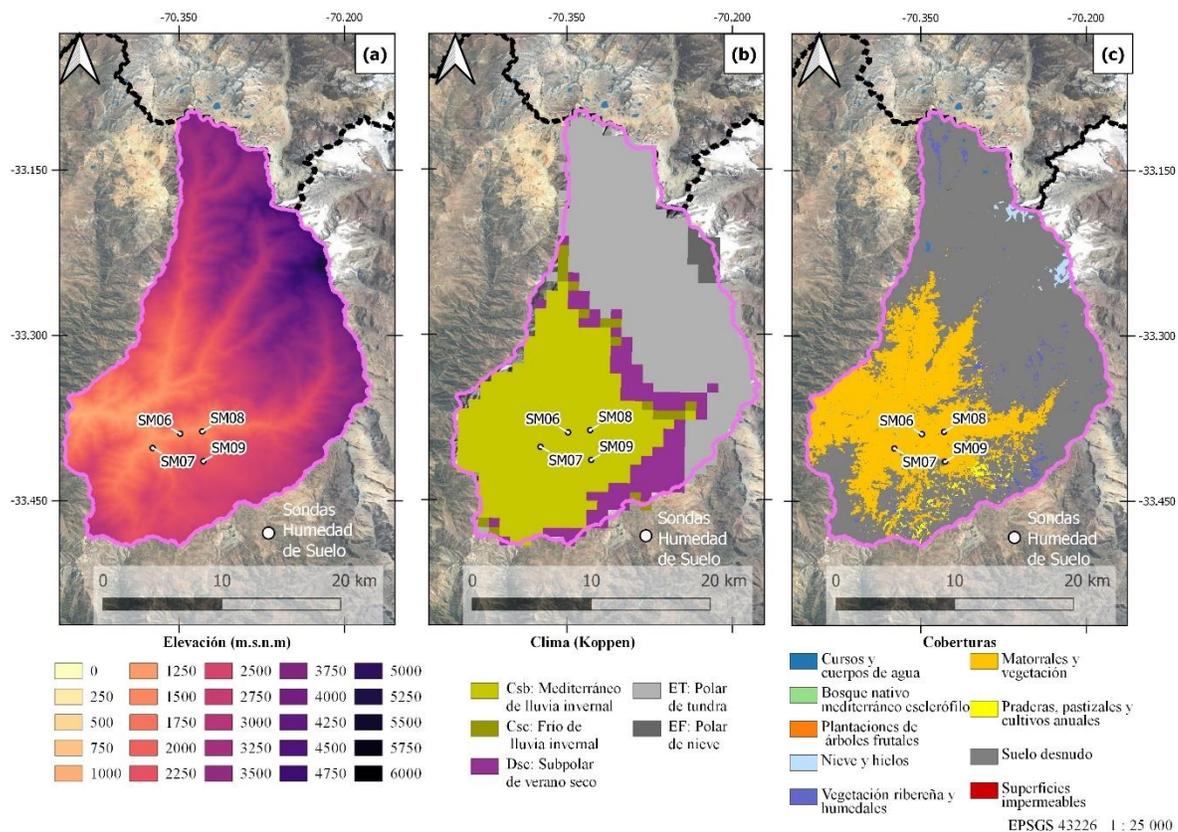


ID	Sitio	Descripción
SM01	Mendez Peumo	Este sitio de monitoreo de la HS se encuentra en la zona poniente de la cuenca de Petorca, específicamente en la Quebrada “El Ajial”, inmerso en un parche de bosque nativo con especies de <i>Peumus boldus</i> (Boldo) y <i>Cryptocarya alba</i> (Peumo) los cuales poseen alturas entre 10 a 15 m. El punto posee una pendiente menor al 5% y se encuentra a una elevación de 574 msnm. Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS (conectados a un dataloger ZL6) se encuentran a las siguientes cinco profundidades: 10, 30, 50, 80 y 130 cm.
SM02	Palmitas	Ubicado a la latitud -32.14 y longitud -71.051, este sitio de monitoreo de la HS se encuentra a una altitud de 879 msnm, con una pendiente menor al 5% y en un parche de matorral de <i>Colliguaja odorifera</i> (colliguay). Los sensores de la estación de monitoreo del contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cinco profundidades: 10, 30, 50, 80 y 120 cm.
SM04	Morro de Chivato	Es el sitio que se encuentra más al norte de todos los puntos de estudio (latitud: -32.076) y es el punto de mayor altitud de las cinco estaciones que se tienen en la cuenca de Petorca a una elevación de 1386 msnm. Se encuentra ubicado al norponiente de la cuenca en una zona natural de matorral con una pendiente entre 5 a 10% y donde existen especies como tevos, espinos, cactáceas, entre otras (no superan los 2m de altura). Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cuatro profundidades: 10, 40, 80 y 110 cm.

<b>SM05</b>	Sobrante	Sitio ubicado en la zona poniente de la cuenca a una elevación de 1240 msnm y a 120 m del río Sobrante. Con registro de datos desde el 15-09-2021 este punto se encuentra ubicado en una zona de matorral con pendiente de 5 a 10%, específicamente cercano a tres individuos de <i>Porlieria chilensis</i> (Guayacán) de altura aproximada de 3 m. Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cuatro profundidades: 10, 40, 70 y 115 cm.
-------------	----------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Ramírez, 2022.

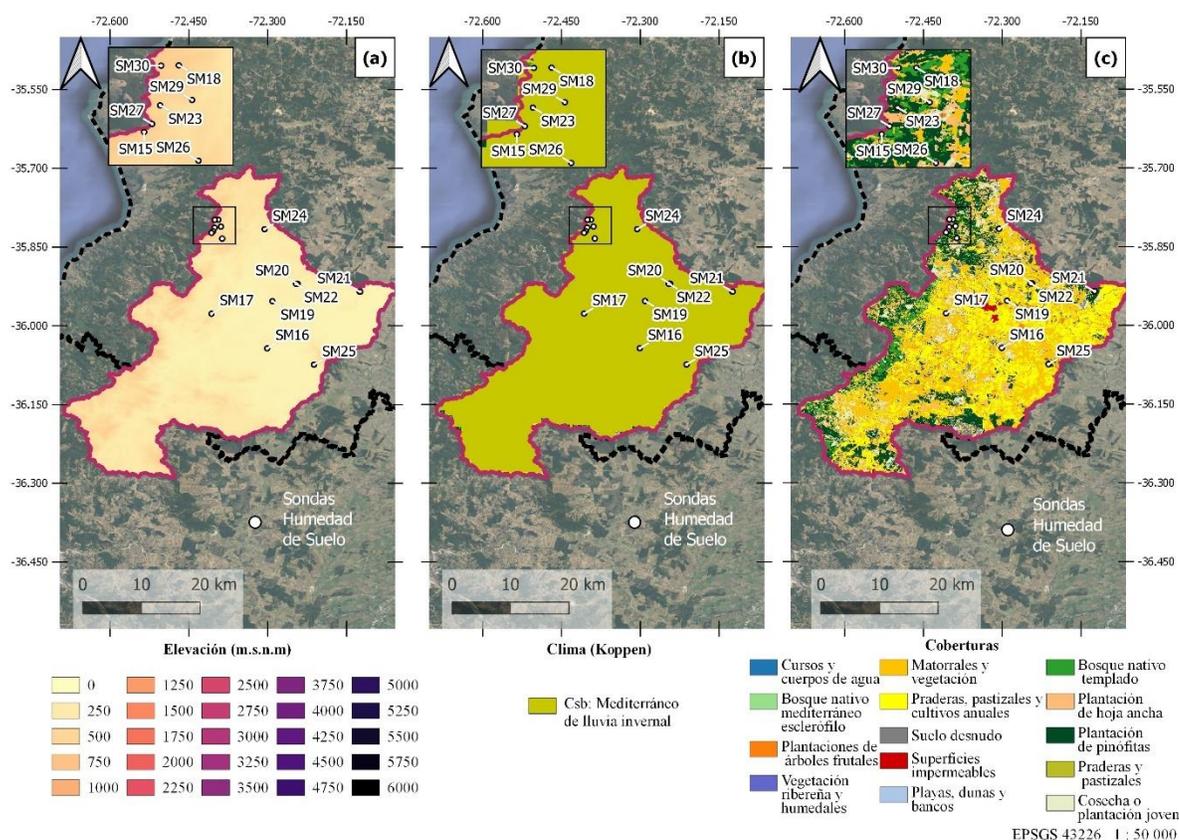
## Apéndice 1.2. Descripción sitios de monitoreo de HS. Mapocho en los Almendros



ID	Sitio	Descripción
<b>SM08</b>	Estero el Risco	Este sitio se encuentra a una altitud de 1469 msnm, siendo un parche de matorral denso con especies principalmente de Tevo (), donde la altura de los individuos que no supera los 2,5 m. Se encuentra cercano al estero el Risco y, a unos 500 metros al norte, se encuentra el río Molina. Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cuatro profundidades: 10, 30, 80 y 120 cm.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Ramírez, 2022.

### Apéndice 1.3. Descripción sitios de monitoreo de HS. Cauquenes en Desembocadura



ID	Sitio	Descripción
SM17	Pilen	Este punto de monitoreo se encuentra inactivo. Correspondía a un sitio de una Viña ubicada en la parte baja de la cuenca a una elevación de 221 msnm que tuvo mediciones entre 2018-04-17 y 2020-01-20. El sensor en el suelo era de tipo EnviroSCAN y posee mediciones a las siguientes cinco profundidades: 20, 50, 80, 120 y 170 cm.
SM19	Inia	Ubicado en Centro Experimental Cauquenes del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), este punto de monitoreo se encuentra en el centro de la cuenca de Cauquenes a una elevación de 156 msnm (corresponde al sitio de menor elevación activo), específicamente en un parche de matorral de <i>Acacia caven</i> con una pendiente menor al 5%. El sensor en el suelo es de tipo EnviroSCAN y posee mediciones a las siguientes cinco profundidades: 20, 50, 80, 120 y 150 cm.
SM21	San Agustín Matorral	Ubicado en un pequeño parche de matorral de <i>Acacia caven</i> (espino) inmerso en una plantación forestal. A una altitud de 171 msnm este sitio tiene mediciones de otras variables como Temperatura, Precipitación y Salvia. El sensor en el suelo son de tipo EnviroSCAN y posee mediciones a las siguientes nueve profundidades: 40, 70, 77, 90, 97, 120, 127, 170 y 177 cm.

**SM23** Molco Pino

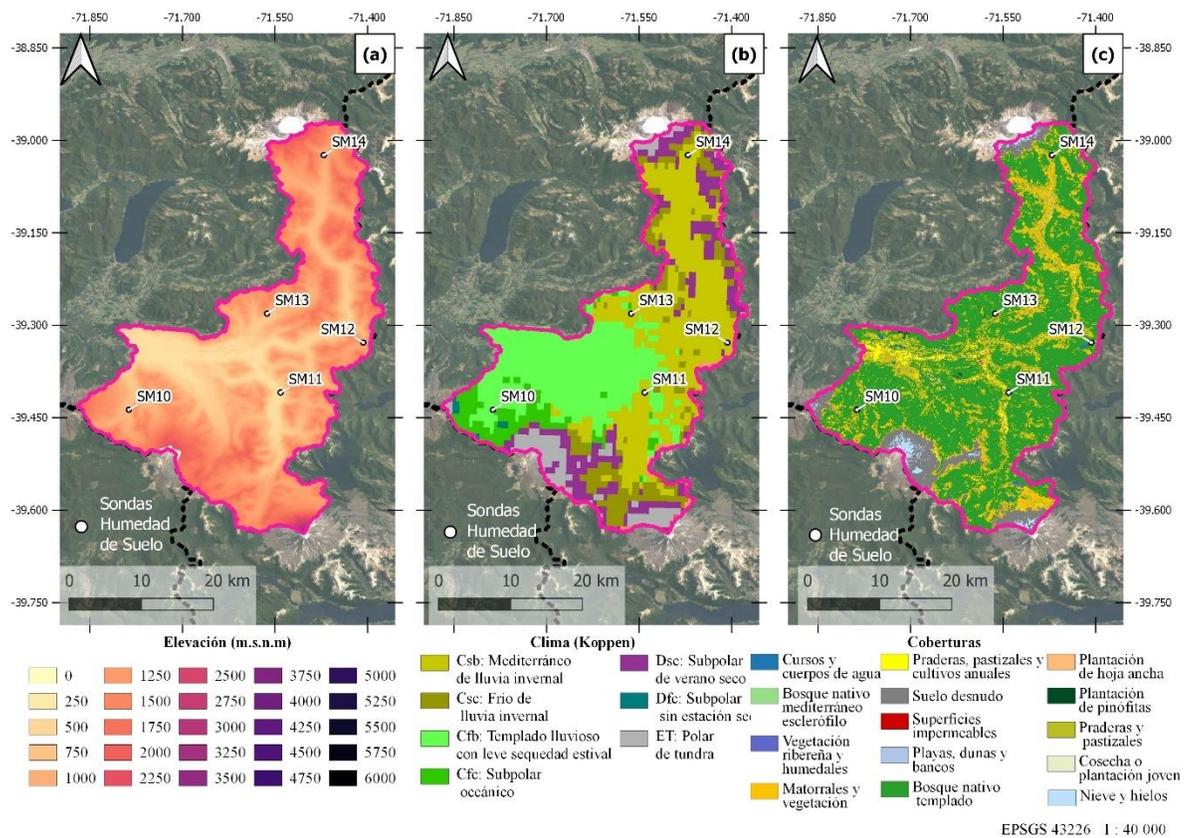
Sitio ubicado en una plantación de individuos de *Pinus radiata*. Se encuentra a una elevación de 451 msnm con una pendiente de 20%. El sensor en el suelo es de tipo EnviroSCAN y posee mediciones a las siguientes nueve profundidades: 28, 30, 58, 60, 88, 100, 128, 140 y 178 cm. Cabe destacar que el instrumento de medición fue ajustado y donde existió un cambio en las profundidades de medición.

**SM24** Raíces

Este punto de monitoreo se encuentra inactivo. Correspondía a un sitio de plantación de forestal de *Pinus radiata* que tuvo mediciones entre “2018-07-18” y “2019-04-22” y que se encontraba a una elevación de 259 msnm. El sensor en el suelo era de tipo EnviroSCAN y posee mediciones a las siguientes cinco profundidades: 20, 40, 70, 100 y 130 cm.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Ramírez, 2022.

**Apéndice 1.4.** Descripción sitios de monitoreo de HS. Trancura antes de LLafenco



ID	Sitio	Descripción
SM10	Palguin alto	Corresponde al punto más al sur de todas las estaciones de monitoreo y se encuentra ubicado en un parche de bosque nativo del sector de Palguin Alto a unos 280 m del río Palguin. Este bosque corresponde a uno de tipo de hojas anchas, observándose principalmente individuos de <i>Nothofagus dombeyi</i> (Coihue), de una altura de 18 a 22 m de altura, aunque existe un estrato arbustivo de 1 a 1.5m de altura, semidenso que nace bajo los árboles más grandes. El sitio se encuentra a una elevación de 861msnm y los sensores corresponden a TEROS 10 y TEROS 12 y se encuentra a seis profundidades de 10,30,70,120,160 Y 200 cm
SM11	Ruta S-938	Encontrado a una elevación de 401 msnm este punto se ubica en una pradera (a orillas de la ruta S-938). Esta cobertura (principalmente de <i>Trevoa trinervis</i> ) se usa para consumo animal. Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cinco profundidades: 10, 30, 60, 110 y 160 cm.
SM13	Puam EcoLodge	Sitio de Bosque nativo ubicado cerca del río Pangui (a unos 650 m en línea recta) a una elevación de 850 msnm y una pendiente de XX%. El sensor se encuentra debajo de un individuo de la especie <i>Podocarpus nubigenus</i> (Manio). Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cinco profundidades: 10, 30, 60, 110 y 160 cm
SM14	Flor del valle	Sitio ubicado a una elevación de 1041 msnm en un parche de bosque nativo específicamente en un individuo de <i>Nothofagus antarctica</i> (Ñirre). Se encuentra a unos metros del río Machín, en las faldas del Estratovolcán inactivo Solipulli. Los sensores de contenido de agua en el suelo son TEROS y se encuentran a las siguientes cinco profundidades: 10, 25, 50, 110 y 160 cm.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Ramírez, 2022.

## Apéndice 2. Porcentaje de cobertura sitios seleccionados.

Sitio	Bosque nativo			Plantación Forestal			Matorral			Pradera			Nieve y hielos			Suelo desnudo		
	E5	E5L	SPL4	E5	E5L	SPL4	E5	E5L	SPL4	E5	E5L	SPL4	E5	E5L	SPL4	E5	E5L	SPL4
SM01	34.5	14.5	35.3	0.0	0.0	0.0	60.5	68.0	58.9	4.7	13.9	5.3	0.0	0.0	0.0	0.1	1.9	0.1
SM02	2.0	0.8	1.1	0.0	0.0	0.0	93.7	86.6	93.1	0.6	3.2	3.1	0.0	0.0	0.0	3.7	7.6	2.6
SM04	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	73.0	43.6	68.8	2.0	0.9	2.7	0.0	0.0	0.0	24.6	51.3	28.3
SM05	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	43.3	61.8	56.1	0.1	2.8	0.2	0.0	0.0	0.0	56.1	32.6	43.3
SM07	0.6	0.1	0.4	0.0	0.0	0.0	72.4	38.1	63.6	0.2	1.1	2.7	0.0	0.1	0.0	26.6	57.6	30.8
SM10	67.9	63.7	70.5	1.1	0.4	0.1	14.0	8.4	12.7	7.3	3.1	4.5	0.1	2.7	3.1	9.6	16.4	9.1
SM11	81.7	39.2	74.2	0.2	0.2	0.3	8.1	9.2	13.3	7.0	4.8	11.0	0.0	0.4	0.0	0.0	4.4	0.9
SM13	76.5	66.8	79.7	0.6	0.2	0.3	14.0	15.9	13.7	8.3	7.2	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0
SM14	36.4	47.6	44.0	0.0	0.1	0.0	11.9	16.8	15.5	3.7	5.2	3.4	19.2	3.5	8.0	28.2	10.5	20.4
SM17	1.5	0.2	2.2	4.1	9.2	3.6	40.8	38.9	43.2	34.8	41.2	29.4	0.0	0.0	0.0	2.5	2.5	2.8
SM19	0.2	0.2	0.2	2.2	5.8	2.1	31.1	15.3	30.0	48.5	75.9	51.8	0.0	0.0	0.0	2.4	0.8	1.8
SM21	0.0	16.1	0.0	19.0	34.6	27.2	27.9	26.9	31.9	46.7	11.6	32.9	0.0	0.0	0.0	1.4	1.3	2.2
SM23	8.8	6.4	10.2	68.6	38.8	67.3	13.4	16.4	12.7	1.5	13.9	1.2	0.0	0.0	0.0	1.4	1.0	1.4
SM24	1.3	1.7	2.0	20.0	16.0	21.9	43.6	40.5	43.2	7.1	13.3	8.5	0.0	0.0	0.0	3.8	3.9	3.5

E5= ERA5, E5L= ERA5-Land y SPL4= SPL4SMAU

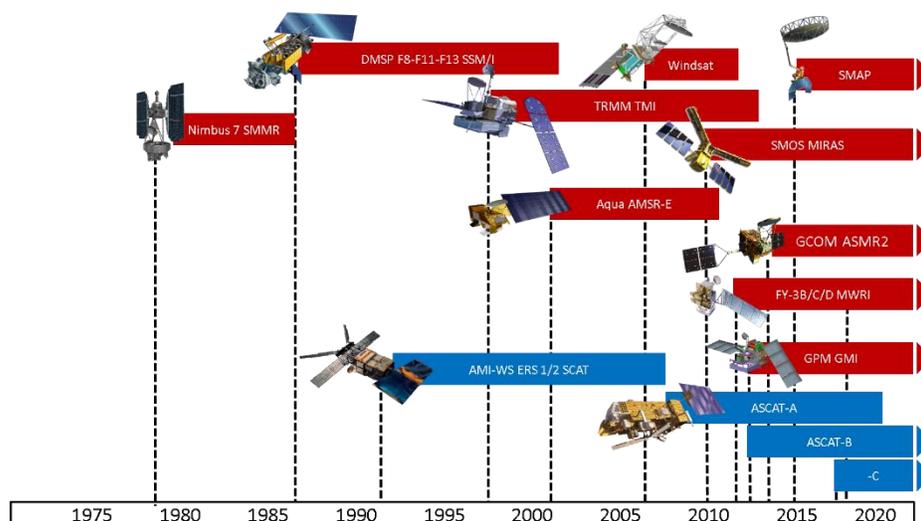
### Apéndice 3. Selección productos grillados.

Los productos grillados utilizados fueron elegidos con la condición de que su descarga fuera gratuita (datos abiertos) y mediante 4 criterios: rango de cobertura temporal, resolución espacial, latencia y profundidad del suelo representada.

#### 1. Cobertura temporal:

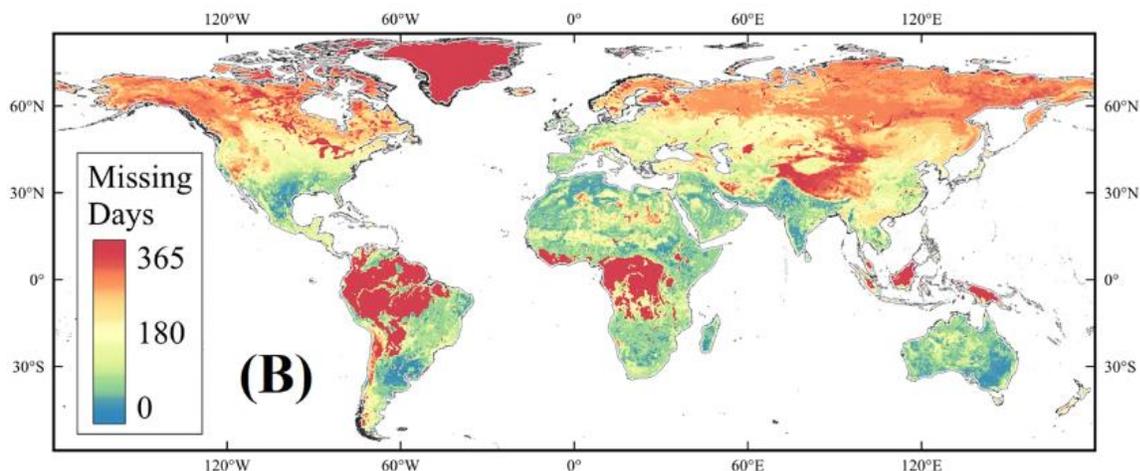
Se descartaron aquellos productos grillados los cuales no tienen estimaciones posteriores al 2021. En la siguiente imagen se puede apreciar ciertos productos grillados de HS estimados a través de observaciones directas (satelitales) y que su funcionamiento ya cesó.

Figura. Cobertura temporal productos (satelitales) grillados de HS.



Fuente: Beck et al., 2021

Figura. Días faltantes para el productos grillado ESA-CCI.



Fuente: Zheng et al., 2023

## 2. Resolución espacial:

Se descartaron aquellos productos grillados que superaran los 30 km en el tamaño de su píxel, como lo pueden ser los productos ASCAT (~30 km), SMOS (~40 km) o AMSR2 (~47 km) (Beck et al., 2021).

## 3. Latencia de subida:

Este criterio hace referencia al tiempo de subida de los datos de productos grillados a su respectivas plataformas de descarga. Productos como ERA5 y SPL4SMAU tienen una latencia de ~3 a ~6 días, lo que significa que se pueden descargar datos con menos de una semana de tiempo, a diferencia de otros productos, como el caso de ESA-CCI, GLDAS-Noah o GLEAM, los cuales tienen una latencia de subida de ~1 año, ~4 meses y ~6 meses, respectivamente.

## 4. Profundidad del suelo representada:

Los productos grillados de observación directa representan la humedad del suelo superficial, pero difieren en la profundidad (cms) que logran representar. Es por esto por lo que productos grillados como AMSR2 y/o ASCAT, que representan la humedad del suelo en los 3 primeros cms del suelo, son descartados debido a la poca profundidad (se utilizan aquellos por sobre los 5 cms de profundidad representada).

## Apéndice 4. Descripción productos grillados de HS

### 1. Misión Soil moisture active passive (SMAP)

El satélite SMAP corresponde a una misión de la NASA, con el objetivo de monitorear la humedad del suelo terrestre global y el estado de congelación/descongelación de la superficie terrestre. Fue lanzado el 31 de enero de 2015 y consta de dos instrumentos, un sensor activo como un radar (1,26 GHz) y un sensor pasivo correspondiente a un radiómetro (1,41 GHz) (O’Neill et al., 2021a). Debido a una falla en el suministro de energía del radar en 2015, solo el radiómetro se encuentra en funcionamiento. SMAP ha permitido el desarrollo y distribución de diferentes productos para la humedad del suelo (Peng et al., 2021). Fueron utilizados los productos SPL3SMP\_E, SPL4SMAU y SPL2SMAP\_S.

### **1.1 SMAP Enhanced L3 Radiometer Global and Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 5 (SPL3SMP\_E)**

El producto SMAP L3\_E (versión 5) corresponde a un producto de observación satelital directa que posee una cobertura global, una resolución espacial de 9 km y un periodo de revisita de 2-3 a días. Este producto de humedad del suelo (de los primeros 5 cms de profundidad) es derivado del producto SMAP Level-2, el cual a su vez es derivado de la interpolación de la temperatura de brillo del producto SMAP Level-1C (L1C) (O’Neill et al., 2021a). El producto grillado se encuentra para la descarga gratuita a través de < [https://nsidc.org/data/spl3smp\\_e/versions/5](https://nsidc.org/data/spl3smp_e/versions/5) > o través de la librería “smapr” (Joseph et al., 2021).

### **1.2. SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 7 (SPL4SMAU)**

El producto de reanálisis SMAP L4 está basado en la asimilación de la temperatura de brillo en los modelos de superficie terrestre, para así mejorar las estimaciones de HS. Se utilizará el SMAP L4 (versión 7) de resolución de temporal de 3 horas y 9 km (Reichle et al., 2022). El producto grillado se encuentra para la descarga gratuita a través de < <https://nsidc.org/data/spl4smau/versions/7> > o través de la librería “smapr” (Joseph et al., 2021).

### **1.3. SMAP/Sentinel-1 L2 Radiometer/Radar 30-Second Scene 3 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 3 (SPL2SMAP\_S)**

El producto combinado entre Sentinel-1/SMAP de una resolución espacial de 3km (el cual utiliza el radar Sentinel-1A y -1B, las temperaturas de brillo de la banda L de SMAP y los coeficientes de retrodispersión de la banda C de Copernicus Sentinel-1 (Das et al., 2020; Das et al., 2019). El producto grillado se encuentra para la descarga gratuita a través de < [https://nsidc.org/data/SPL2SMAP\\_S\\_s/versions/3](https://nsidc.org/data/SPL2SMAP_S_s/versions/3) > o través de la librería “smapr” (Joseph et al., 2021).

### **2.1 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)**

ERA5 corresponde a un conjunto de datos de clima global generados por el modelo CY41R2 del “ECMWF Integrated Forecast System (IFS)”, el cual combina datos de modelos con observaciones de todo el mundo utilizando las leyes de la física. Este conjunto de realización de alta resolución (cada un hora y con una resolución espacial de 25 km) reemplaza a ERA5-

Interim (Bell et al., 2021). Tiene una cobertura de datos de enero de 1940 al presente, con una latencia de actualización de alrededor de 5 días y que se puede descargar de manera gratuita a través de la página <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>> o través de la librería “ecmwf” (Hufkens, Stauffer & Campitelli, 2019).

## 2.2 ERA5-Land

ERA5-Land corresponde a un conjunto de datos de reanálisis similar a ERA5, pero con una resolución espacial mejorada (~9km). Utiliza el modelo del ECMFW denominado CY45R1 y que incorpora la hidrología de la superficies terrestre (H-TESEL) (Muñoz et al., 2019). Este conjunto está disponible para uso público y las variables abarcan el periodo de 1950 a 5 días antes de la fecha actual y que se puede descargar de manera gratuita a través de la página <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>> o través de la librería “ecmwf” (Hufkens, Stauffer & Campitelli, 2019).

## Apéndice 5. Descripción datos Auxiliares

### 1. CAMELS-CL

Se utilizaron las delimitaciones de las cuatro cuencas que se encuentran en la plataforma Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies – Chile Dataset (CAMELS-CL), donde su proceso metodológico de modelación se explica en la publicación de Álvarez-Garretón et al. (2018).

### 2. Clasificación climática de Koeppen-Geiger

El producto grillado Koeppen-Geiger utiliza una resolución espacial de 1 km y se basa en una amplia gama de datos, incluyendo datos de temperatura y precipitación de alta resolución, topografía, vegetación y otros factores climáticos y ambientales. El enfoque del producto es proporcionar una clasificación climática global que sea coherente y comparable en diferentes escalas espaciales. Este producto se basa en el sistema climático de Köppen, que ha sido ampliamente utilizado durante más de un siglo para clasificar los climas de todo el mundo y su descripción del desarrollo y la validación del producto de clasificación climática global se puede encontrar en el artículo científico "*A global 1-km consensus land-cover product for biodiversity and ecosystem modelling*" de Beck et al. (2018)

### 3 Landcover Zona Centro-Sur Chile

Para el uso y cobertura de suelo se utilizará el producto de Landcover realizado por Ceballos et al., (2018)

### 4. Productos grillados CR2

Para la precipitación se utilizará el producto grillado de precipitación creado por el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR2, s.f.), el cual tiene una resolución espacial de

aproximadamente 5 x 5 km (0.05° lat-long) a una escala diaria. El producto se descargará de la plataforma < <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>>. Además, se descargarán los datos de precipitación de estaciones meteorológicas pertenecientes a INIA y DGA, sumado a las mediciones realizadas por pluviómetros del proyecto Fondecyt 1212071. Para la temperatura también se descargará los datos de las mismas fuentes de información.

### 5. Topografía

Para la topografía de las cuencas se utilizará el producto ASTER GDEM de una resolución espacial de 30 metros, descargado desde la Infraestructura de Datos Geoespaciales de Chile (IDE, s.f).

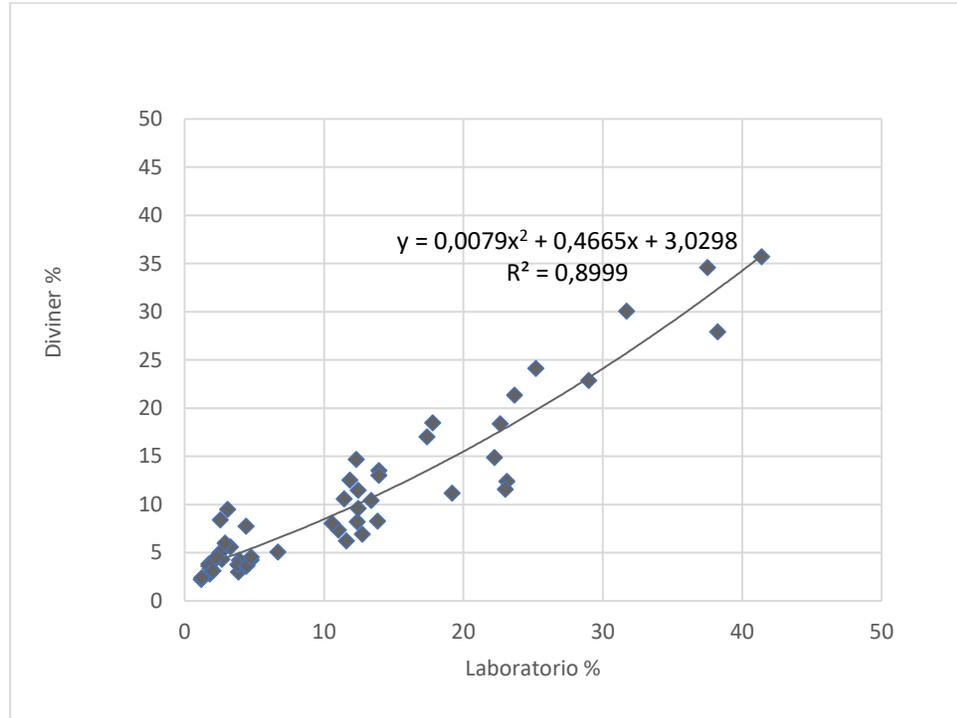
### 6. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

MODIS es un sensor remoto que se encuentra a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA operados en órbita síncrona solar. El sensor MODIS tiene 36 bandas espectrales que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo térmico y tiene una resolución espacial de 250 m a 1 km, lo que permite obtener información sobre una amplia variedad de variables ambientales, incluyendo la temperatura de la superficie terrestre e índices de vegetación (CITA). Se descargaron los productos MYD11A1, MOD13A2 y MCD15A3H a través del Sistema de Información y Datos del Sistema de Observación de la Tierra (EOSDIS) de la NASA.

### Apéndice 6. Resumen ecuaciones de calibración utilizadas en sondas EnviroSCAN

Sitio	ID	Formula calibración	R2	Estado	Utilizado
Pilen	SM17	La Granja Matorral		Sin Calibrar	Sin Calibrar
Inia	SM19	$- 8.4219 + 1.5235x$	0.84	En calibración	Sin Calibrar
San Agustín Matorral	SM21	$-0.008 + 1.05x$	0.97	Calibrado	Calibrado
Molco Pino	SM23	$0.0304x^2 - 0.4699x + 3.2936$	0.69	En calibración	Sin Calibrar
Raíces	SM24	San Pedro		Sin Calibrar	Sin Calibrar

## Apéndice 7. Ecuación calibración general Diviner 2000



## Apéndice 8. Descripción métricas de bondad

El *ubRMSE* aborda la problemática del sesgo, restando el valor de *Bias* de cada diferencia individual entre las observaciones y las predicciones. Esto lo hace especialmente útil en campos como la teledetección, la hidrología y otros dominios científicos donde las predicciones pueden estar sistemáticamente sesgadas debido a varios factores (Beck et al., 2021; Saeedi, 2021).

El *PBIAS* permite establecer si un modelo es preciso y si tiende a errar sistemáticamente en una dirección en particular, expresado en términos porcentuales. Un *PBIAS* cercano a cero sugiere que el modelo es, en promedio, preciso y sin tendencia a sobreestimar o subestimar. Un *PBIAS* positivo indica que el modelo tiende a sobreestimarlas las observaciones, mientras que un *PBIAS* negativo sugiere que el modelo tiende a subestimarlas (Delgado-Rodríguez y Lorca, 2004).

El coeficiente de correlación ( $r$ ) es una métrica que establece la correlación lineal entre las variables modeladas y las variables medidas en terreno. Por lo que, si esta métrica es mayor a cero, existirá una mayor correlación entre las mediciones en terreno y las estimaciones de los diversos productos grillados (Beck et al., 2021; Saeedi, 2021).

El *KGE* intenta ofrecer una evaluación más holística del rendimiento del modelo, ya que combina correlación, sesgo y variabilidad en una sola métrica. Tiene un dominio de  $-\infty, 1$  y, a pesar de que el valor uno indica una correlación perfecta entre los datos modelados y observados (Gupta et al., 2009), no existe un consenso sobre los valores de los umbrales inferiores que determinarían una mala representación de los datos simulados (Xu, 2020).

## Apéndice 9. Artículos científicos de productos grillados de HS y sus respectivas métricas

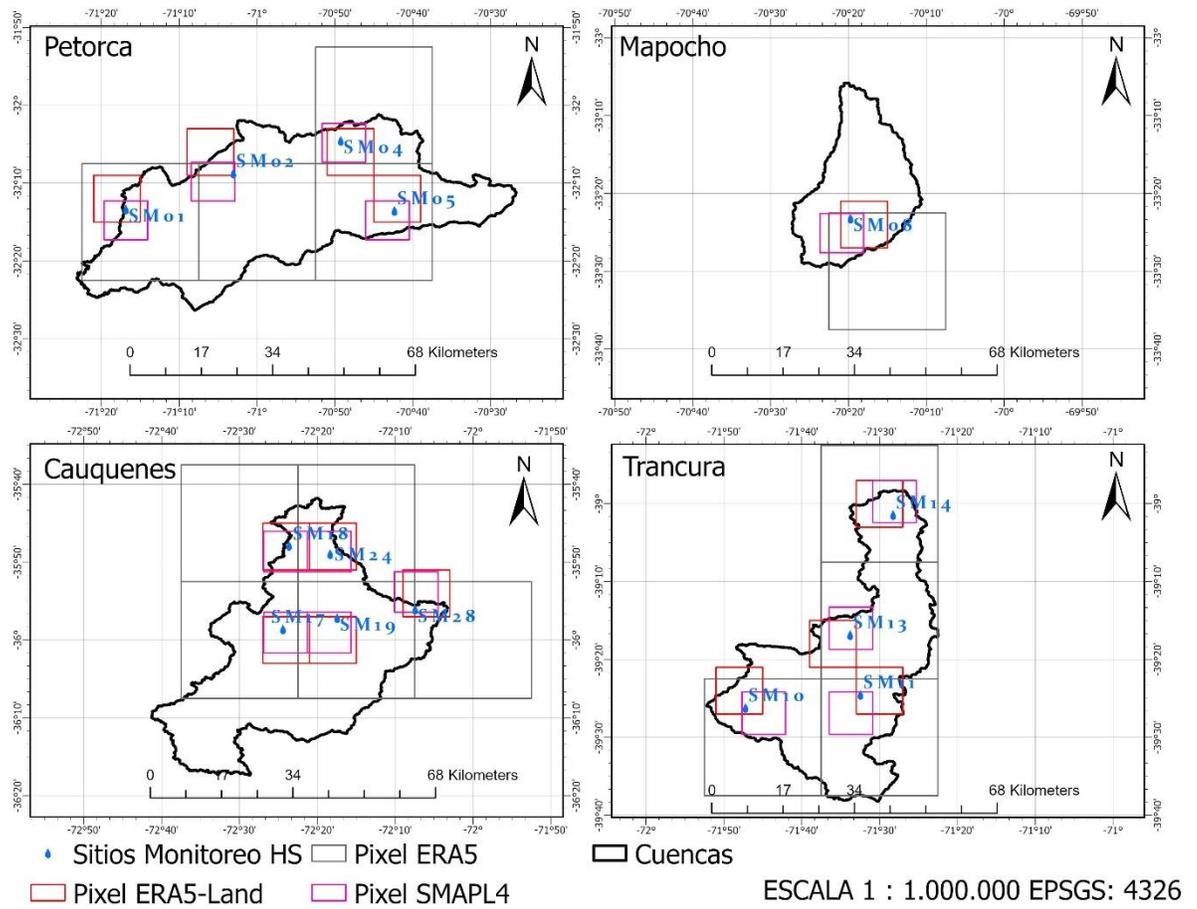
Artículo	Año (Perfil)	PRODUCTOS	MÉTRICAS	Valores (promedio)
<a href="#">Comprehensive evaluation of satellite-based and reanalysis soil moisture products using <i>in situ</i> observations over China</a>	2021 (SSM)	ERA5	ubrmse bias r	E5: ubrmse:0.019-0.035 bias: 0.011-0.123 r: 0.244-0.538
<a href="#">Evaluation of 18 satellite- And model-based soil moisture products using <i>in situ</i> measurements from 826 sensors</a>	2021 (SSM)	ERA5, ERA5-Land, SPL4SMAU, SPL3SMP	r	r: E5: 0.68 E5I: 0.72 SPL4SMAU: 0.70 SPL3SMP: 0.65
<a href="#">Evaluation of SMAP Level 2, 3, and 4 Soil Moisture Datasets over the Great Lakes Region</a>	2020 (SSM-RZSM)	SPL4SMAU,SPL3SMP, SPL2SMAP_S	ubrmse r	SPL4SMAU: ssm (rzsm) ubrmse 0.03 (0.02) r: 0.65 (0.6)  SPL3: ssm ubrmse 0.01 r: 0.75  SP23: ssm ubrmse 0.03 r: 0.7
<a href="#">Evaluation of gridded soil moisture products over varied land covers, climates, and soil textures using <i>in situ</i> measurements: A case study of Lake Urmia Basin</a>	2021 (SSM)	SPL4SMAU,SPL3SMP_E	rmse ubrmse bias r	SPL4SMAU: rmse: ubrmse: bias:  SPL3: rmse: ubrmse: bias:
<a href="#">Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations</a>	2019 (SSM)	SPL3SMP	rmse ubrmse bias r	SPL3 ubRMSE: 0.047
<a href="#">Estimation and evaluation of high-resolution soil moisture from merged model and Earth observation data in the Great Britain</a>	2021 (SSM)	SPL4SMAU, SPL3SMP, SPL2SMAP_S	ubrmse bias r	SPL4SMAU: ubrmse:0.04 r: 0.75  SPL3: ubrmse:0.05

r: 0.78

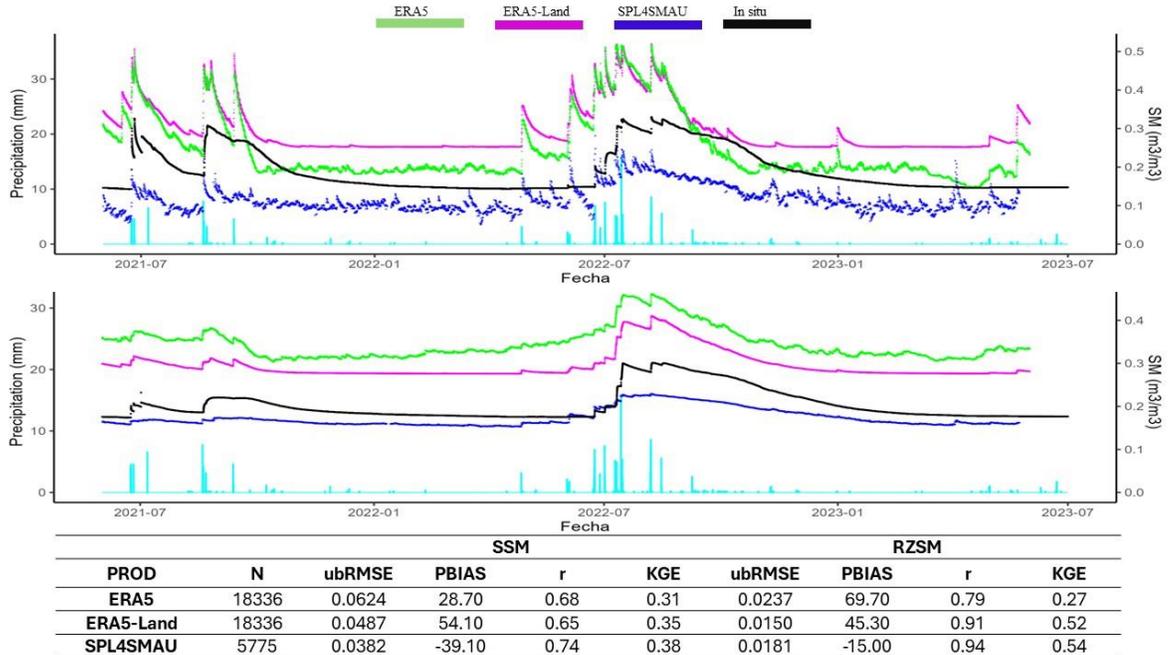
SPL2:  
ubrmse:0.07  
bias: -0.15  
r: 0.62

<a href="#">Assessment of SMAP and SMOS soil moisture products using triple collocation method over Inner Mongolia</a>	2022 (SSM)	SPL3SMP	rmse ubrmse bias r	SPL3: rmse:0.078 ubrmse:0.064 r: 0.512
<a href="#">A comprehensive validation of the SMAP Enhanced Level-3 Soil Moisture product using ground measurements over varied climates and landscapes</a>	2019 (SSM)	SPL3SMP	rmse ubrmse bias r	SPL3: rmse:0.085 ubrmse: 0.055 r:0.65
<a href="#">Evaluation of remotely sensed and reanalysis soil moisture products over the Tibetan Plateau using in-situ observations</a>	2015 (SSM)	ERA5	rmse ubrmse bias r	ERA5: rmse:0.09 ubrmse 0.03: r: 0.746
<a href="#">Soil Moisture Mapping from Satellites: An Intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over Two Dense Network Regions at Different Spatial Scales</a>	2018 (SSM)	SPL3SMP	rmse ubrmse bias	SPL3: rmse:0.06 ubrmse 0.06: bias: -0.05
<a href="#">Spatiotemporal Characteristics of Soil Moisture and Land–Atmosphere Coupling over the Tibetan Plateau Derived from Three Gridded Datasets</a>	2022 (SSM)	SPL3SMP ERA5	rmse ubrmse bias r	ERA5: rmse 0.2 ubrmse:0.3 bias:0.2 r:0.74  SMAP rmse: 0.02 ubrmse:0.07 bias:0.16 r:0.65

### Apéndice 10.1. Distribución espacial píxeles y sitios de monitoreo de HS.

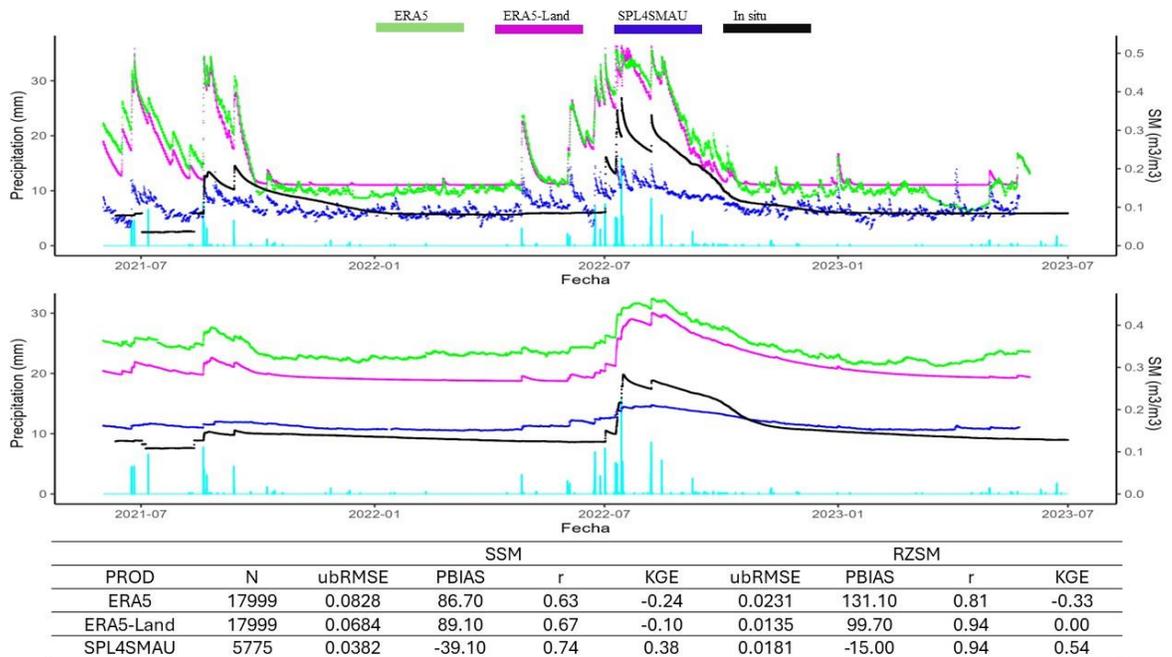


### Apéndice 10.2. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM01. Matorral



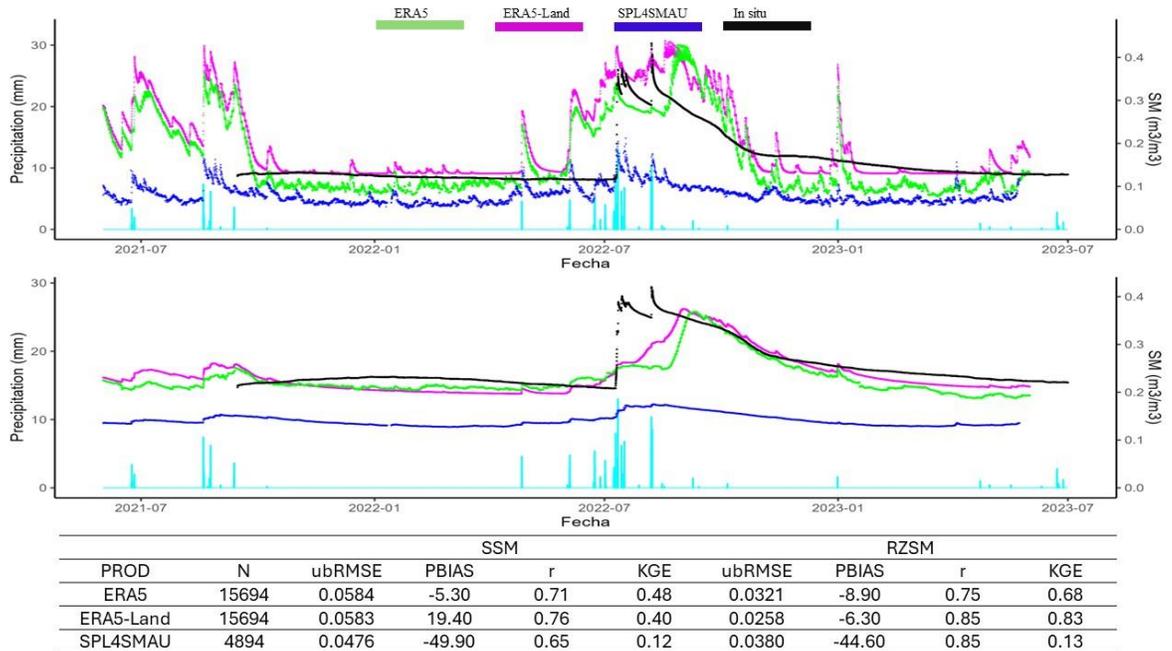
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

### Apéndice 10.3. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM02. Matorral



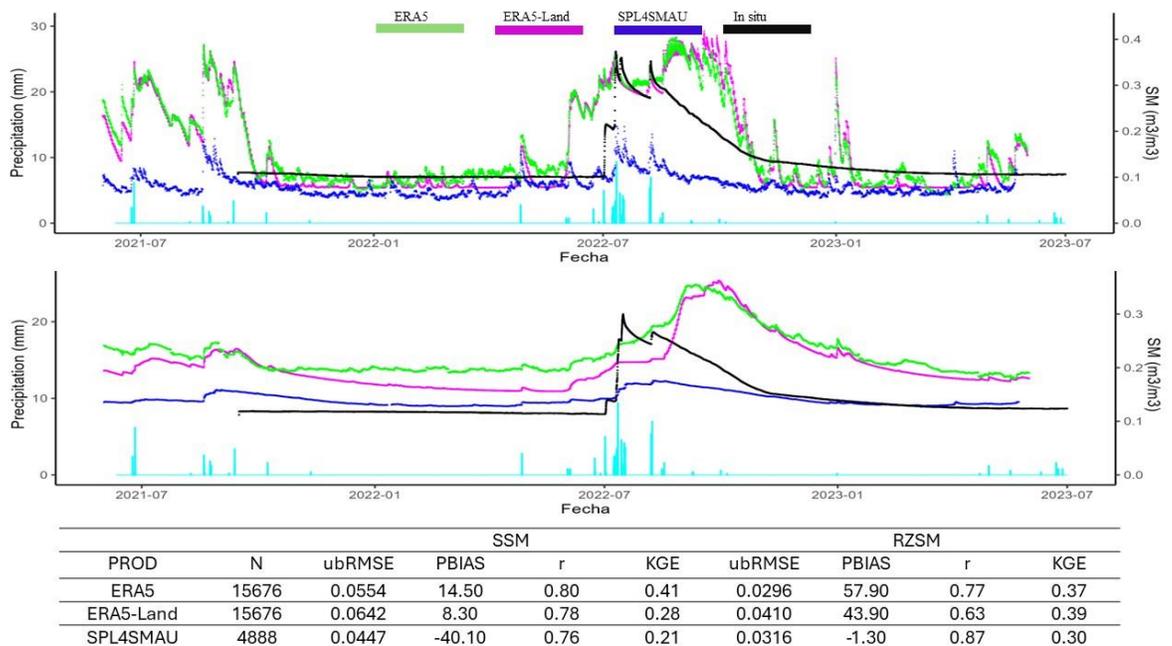
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.4.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM04. Matorral



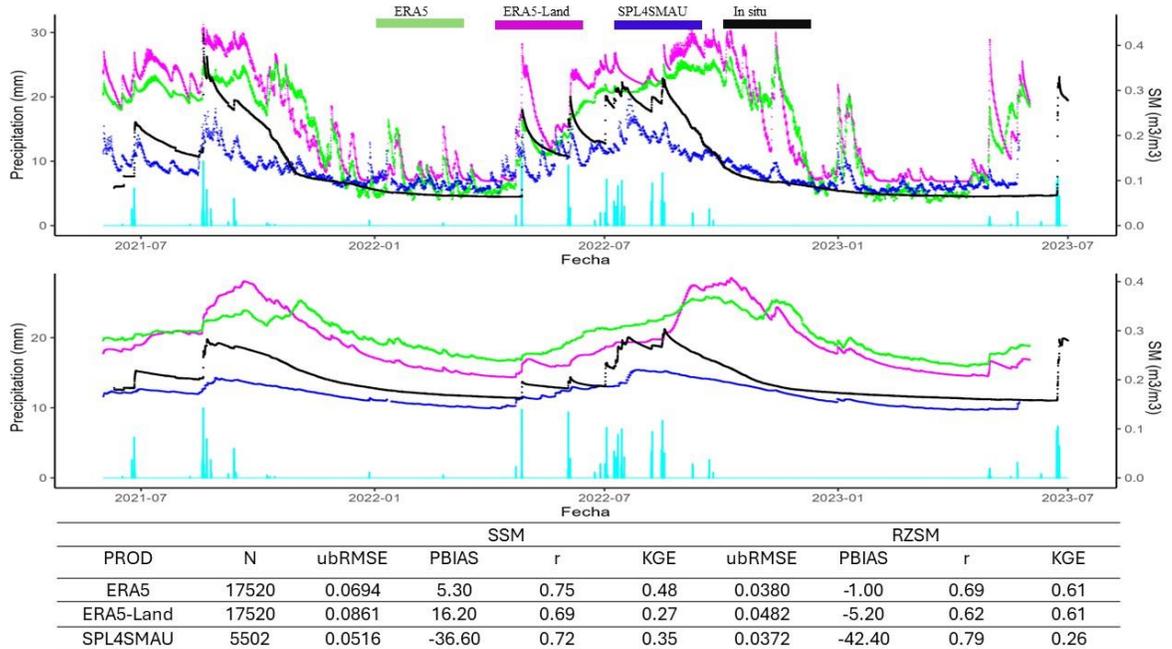
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.5.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM05. Matorral



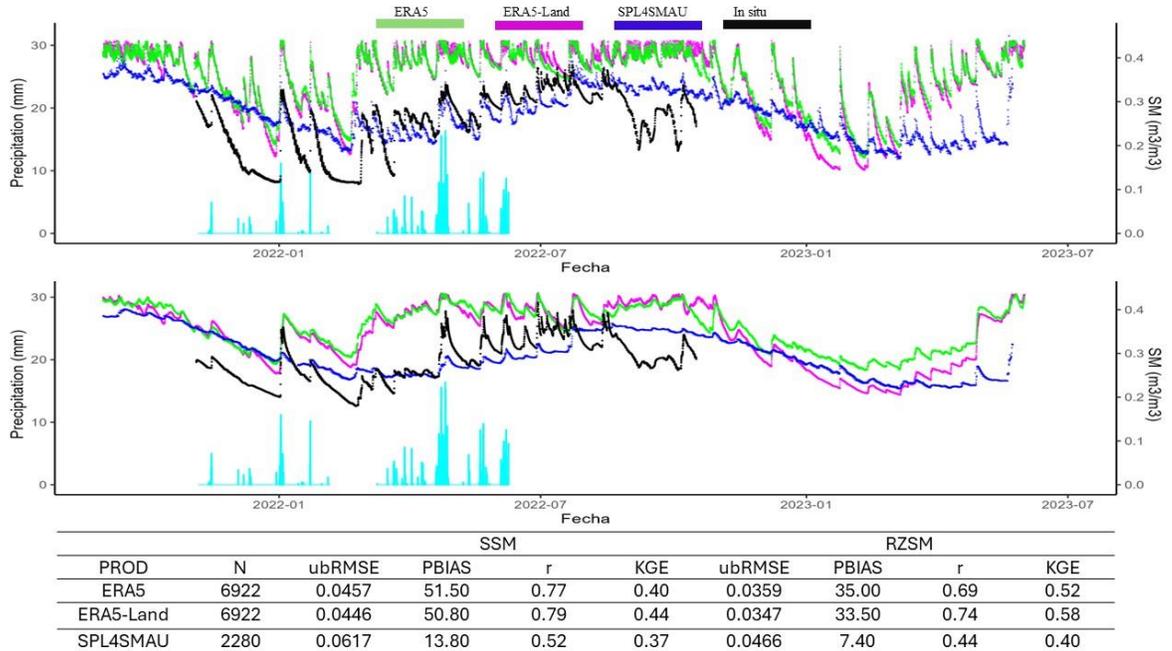
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

### Apéndice 10.6. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM07. Matorral



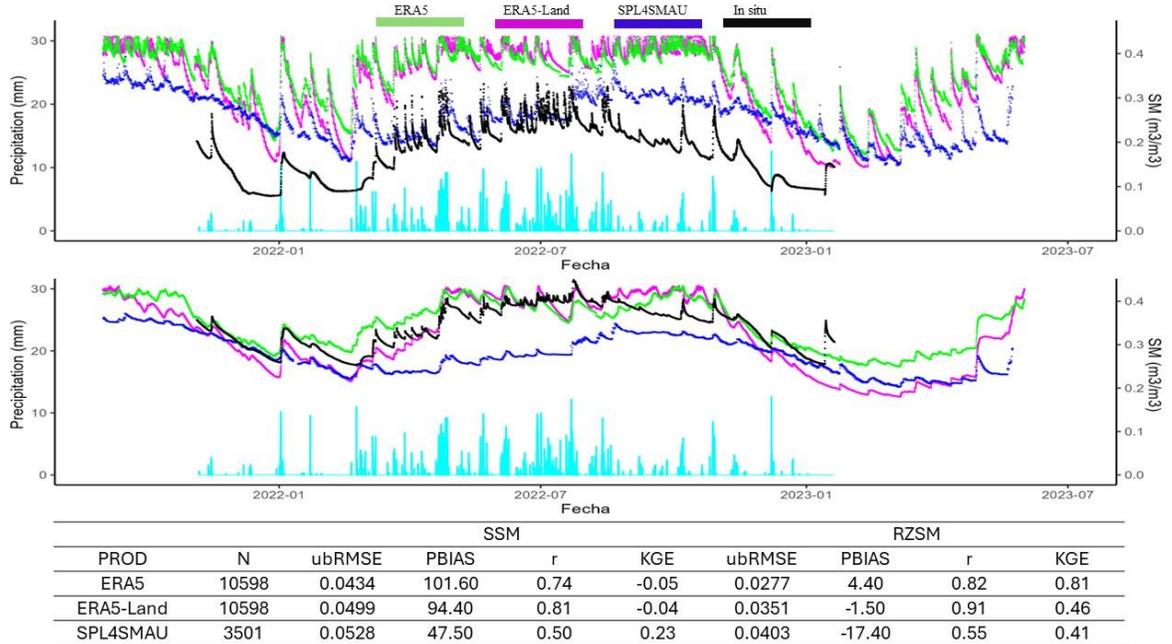
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

### Apéndice 10.7. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM10. Bosque Nativo



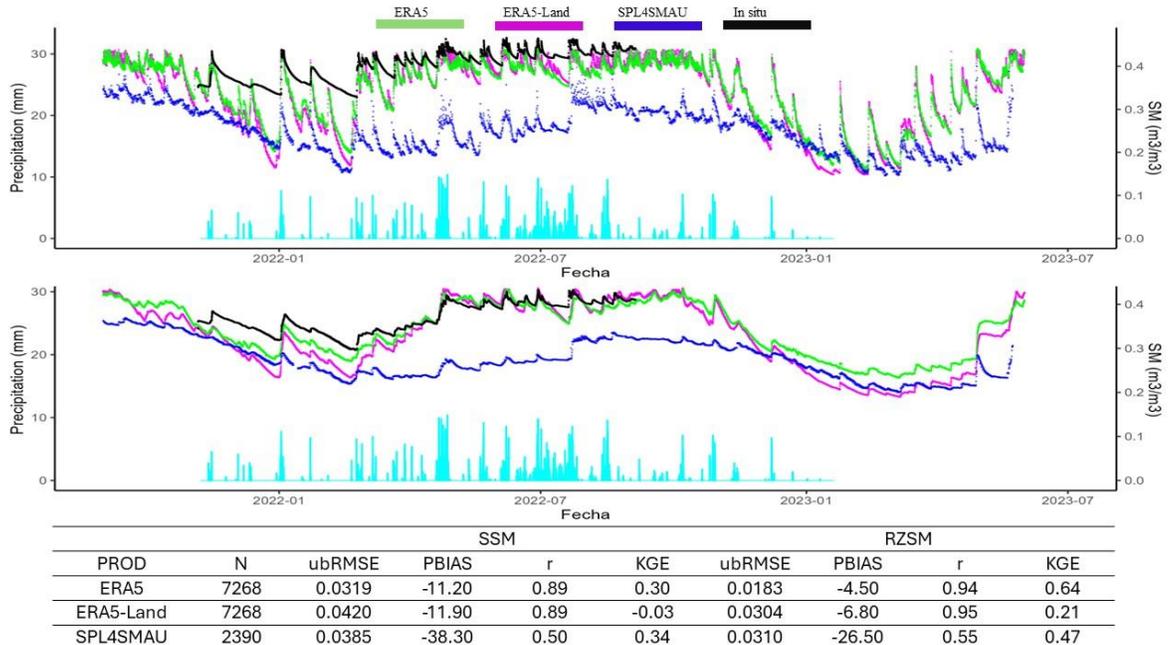
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.8.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM11. Bosque Nativo



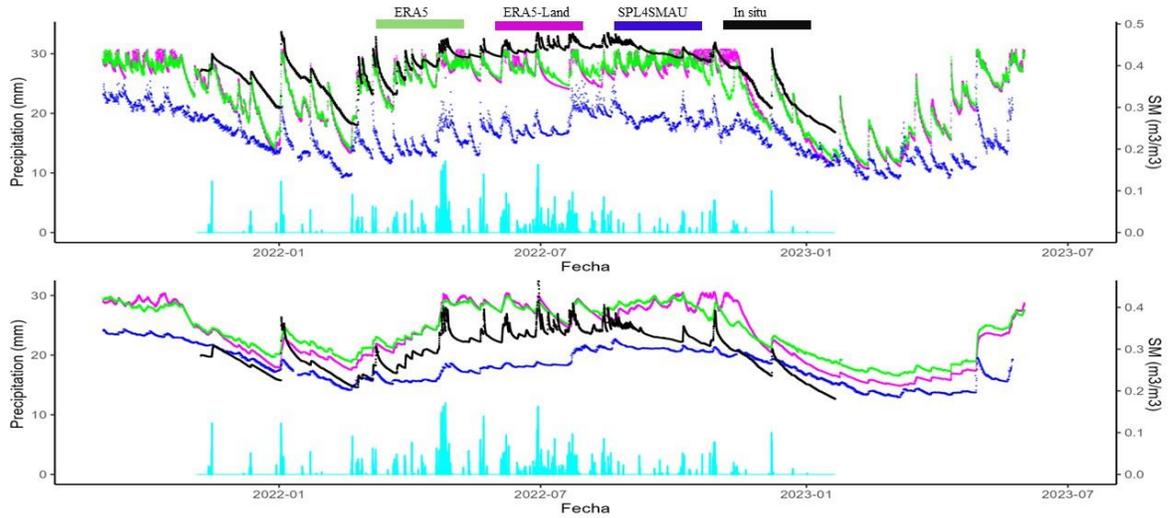
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.9.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM13. Bosque Nativo



**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

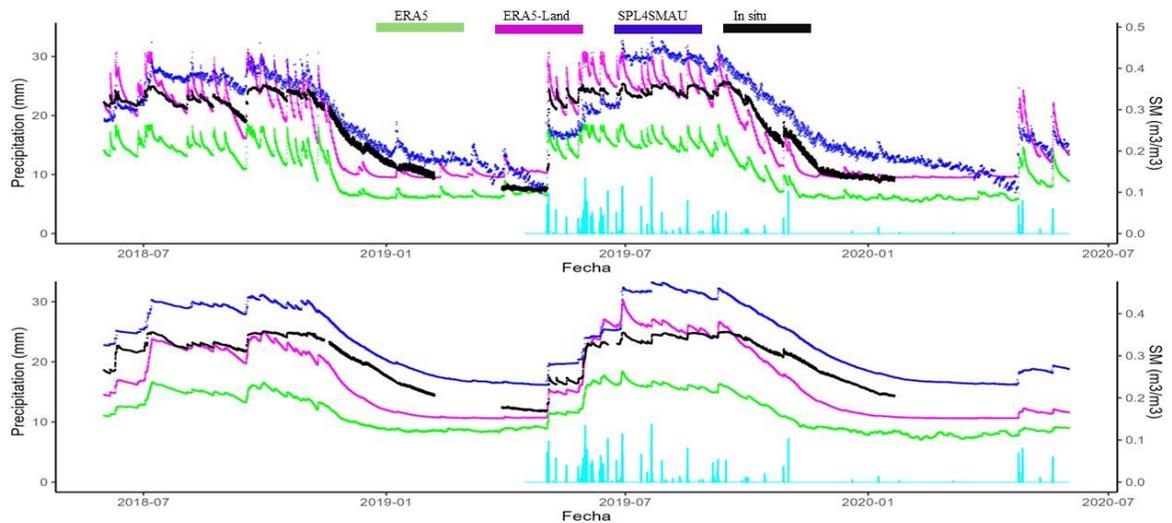
**Apéndice 10.10.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM14. Bosque Nativo



PROD	N	SSM				RZSM			
		ubRMSE	PBIAS	r	KGE	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	10537	0.0273	-10.80	0.90	0.81	0.0202	19.70	0.91	0.78
ERA5-Land	10537	0.0346	-10.60	0.86	0.74	0.0288	17.80	0.87	0.71
SPL4SMAU	3480	0.0393	-39.70	0.73	0.43	0.0395	-10.60	0.60	0.43

**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

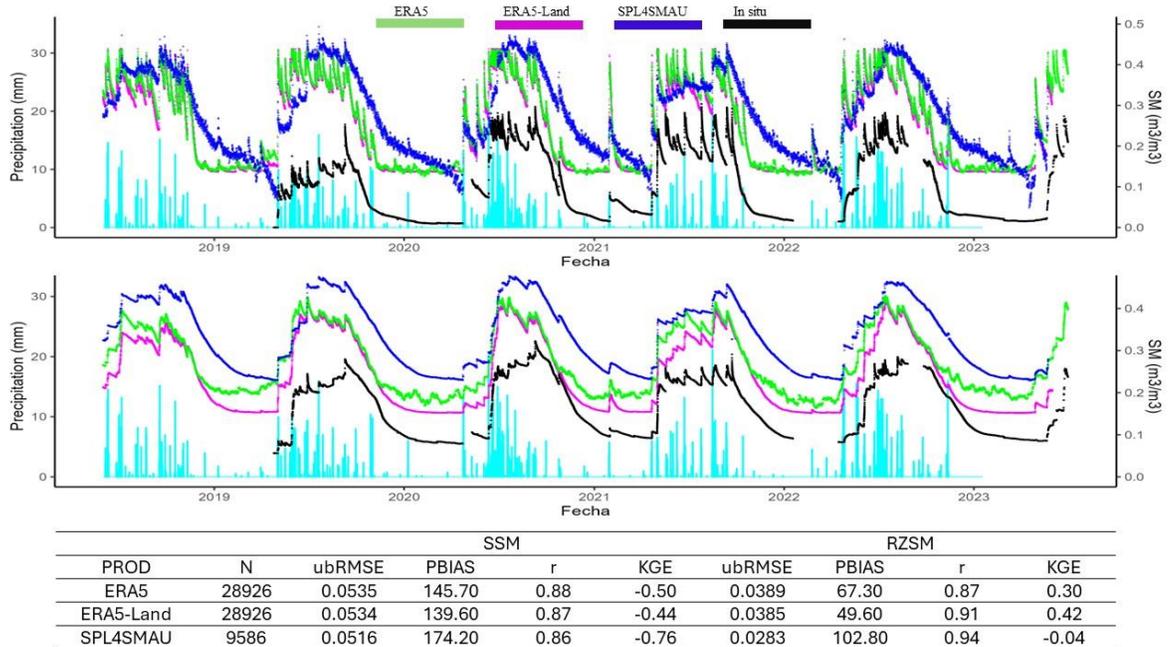
**Apéndice 10.11.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM17. Agricultura



PROD	N	SSM				RZSM			
		ubRMSE	PBIAS	r	KGE	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	13687	0.0395	-38.40	0.91	0.50	0.0285	-39.30	0.87	0.52
ERA5-Land	13687	0.0405	-1.00	0.91	0.81	0.0360	-10.40	0.92	0.57
SPL4SMAU	4563	0.0460	12.80	0.87	0.80	0.0254	22.80	0.96	0.62

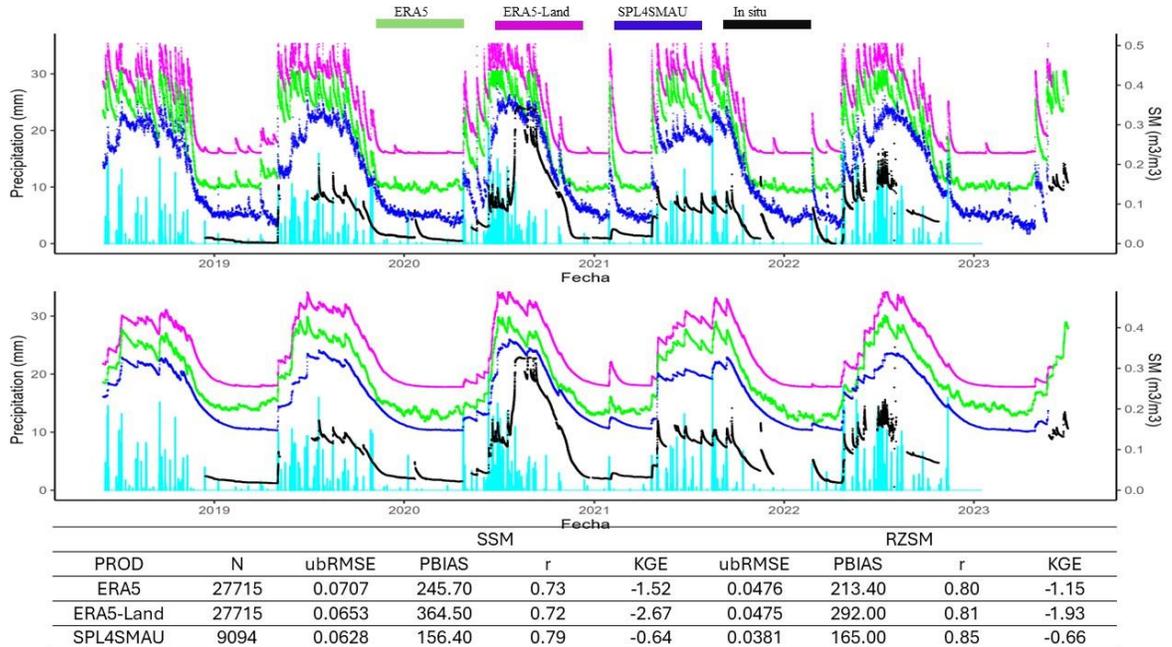
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

### Apéndice 10.12. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM19. Matorral



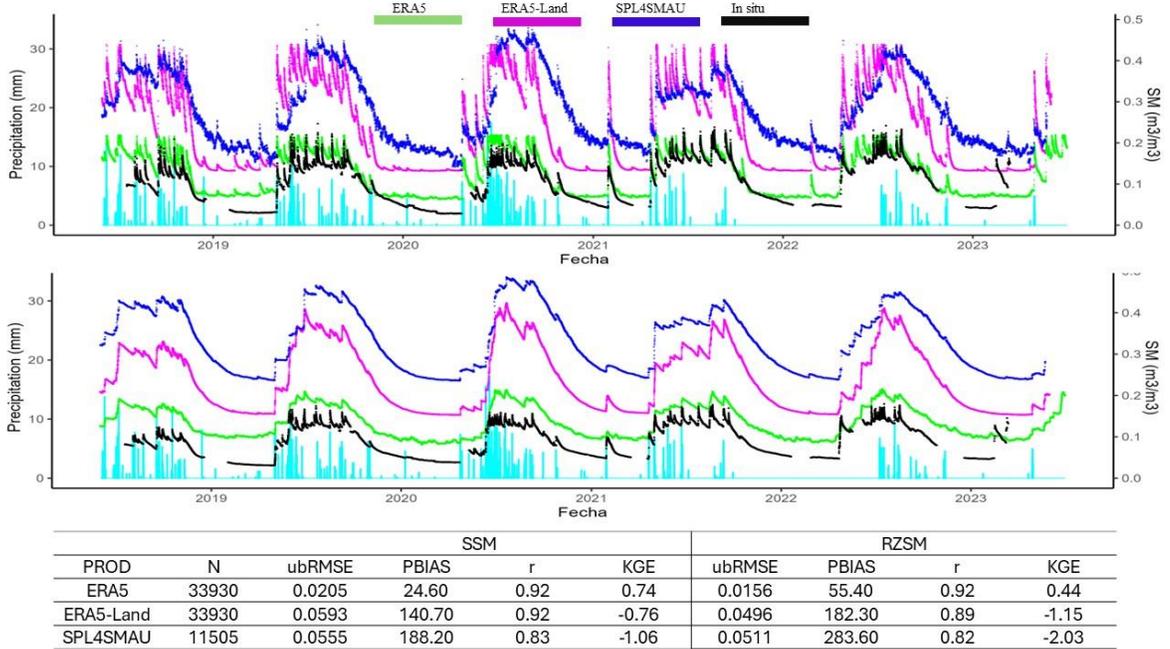
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

### Apéndice 10.13. Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM21. Matorral



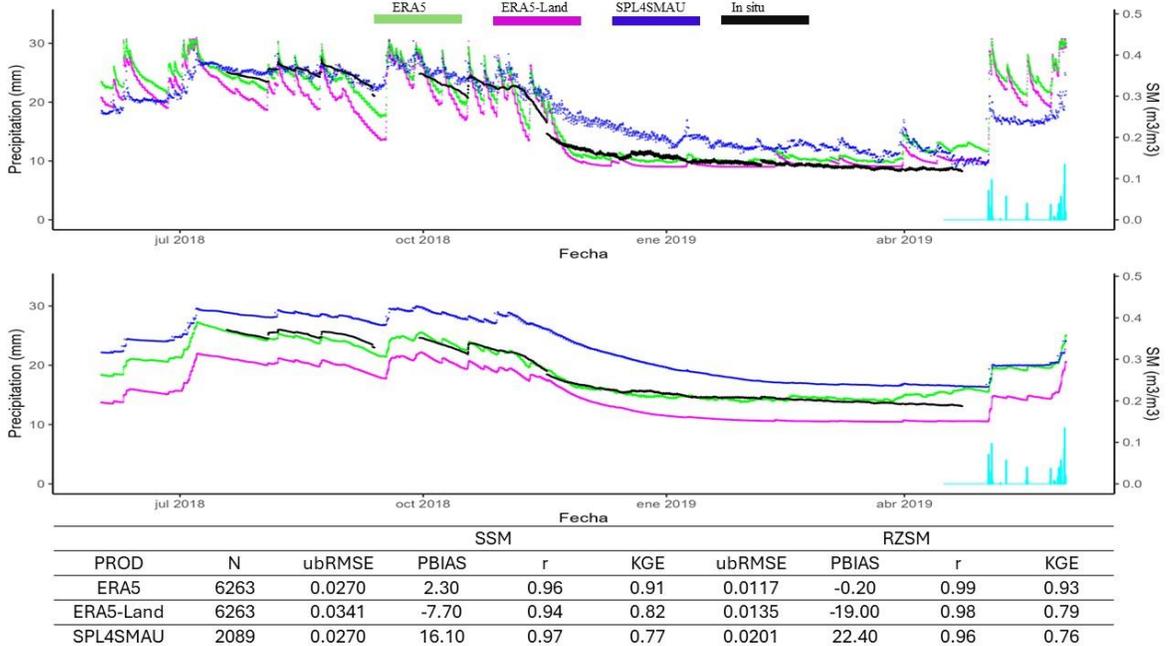
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.14.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM23. Plantación Forestal



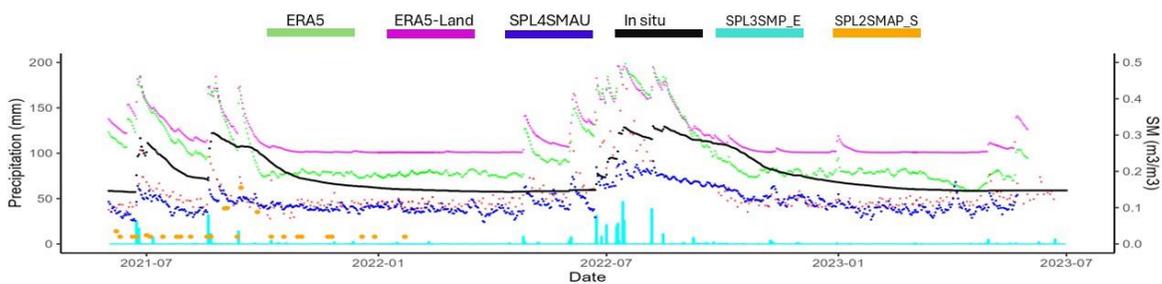
**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 10.15.** Dinámica de la SSM (arriba) y RZSM (abajo) Horaria. SM24. Plantación Forestal



**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

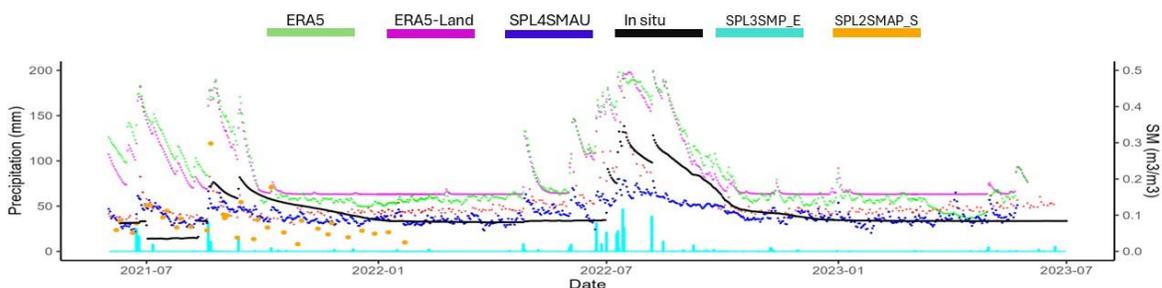
### Apéndice 11.1. Dinámica de la SSM Diaria. SM01. Matorral



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	735	0.0621	-22.30	0.68	0.48
ERA5-Land	735	0.0484	-35.10	0.65	0.5
SPL2SMAP_S	28	0.0419	499.00	0.55	-4.04
SPL3SMP_E	382	0.0504	36.00	0.5	0.38
SPL4SMAU	723	0.0377	64.40	0.75	0.02

SSM: Humedad del suelo superficial.

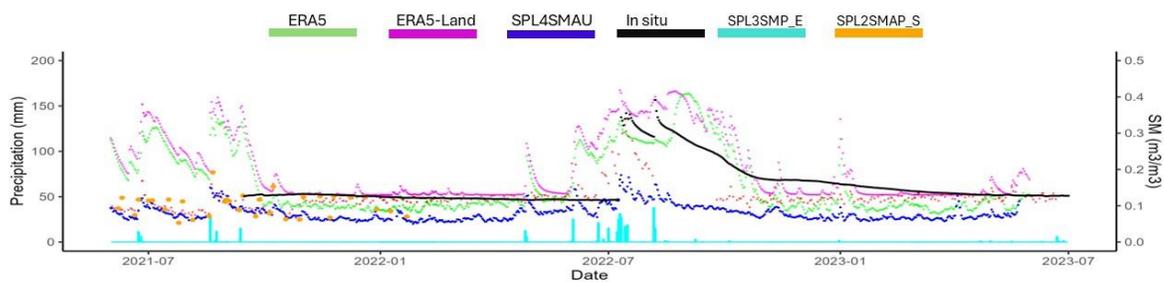
### Apéndice 11.2. Dinámica de la SSM Diaria. SM02. Matorral



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	721	0.0825	-46.50	0.63	0.26
ERA5-Land	721	0.0680	-47.10	0.67	0.32
SPL2SMAP_S	32	0.0616	29.00	0.23	0.17
SPL3SMP_E	375	0.0395	-19.20	0.63	0.58
SPL4SMAU	709	0.0451	10.90	0.69	-0.29

SSM: Humedad del suelo superficial.

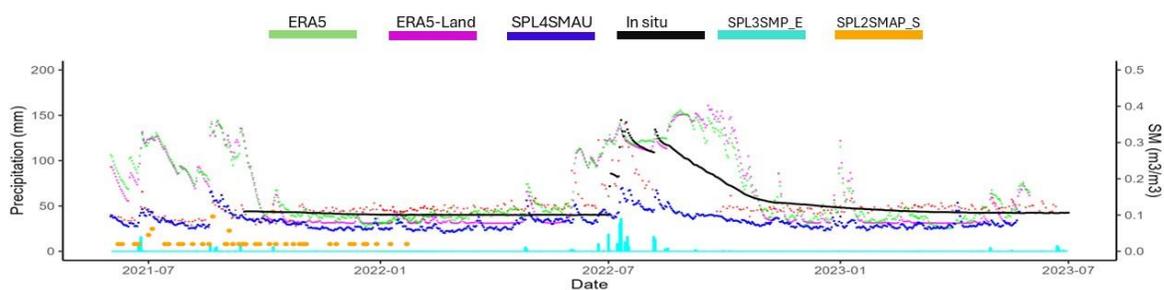
### Apéndice 11.3. Dinámica de la SSM Diaria. SM04. Matorral



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	624	0.0580	5.60	0.72	0.59	
ERA5-Land	624	0.0579	-16.30	0.76	0.56	
SPL2SMAP_S	15	0.0288	30.30	0.17	-0.26	
SPL3SMP_E	323	0.0352	13.10	0.6	0.51	
SPL4SMAU	612	0.0473	99.70	0.66	-1.06	

SSM: Humedad del suelo superficial.

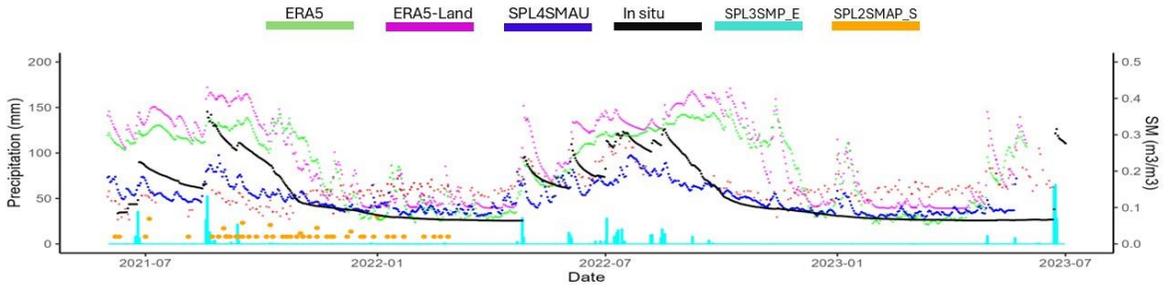
### Apéndice 11.4. Dinámica de la SSM Diaria. SM05. Matorral



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	624	0.0553	-12.80	0.8	0.58	
ERA5-Land	624	0.0641	-7.80	0.78	0.53	
SPL2SMAP_S	20	0.0189	332.20	0.23	-2.51	
SPL3SMP_E	323	0.0309	-3.80	0.7	0.58	
SPL4SMAU	612	0.0445	66.90	0.77	-0.95	

SSM: Humedad del suelo superficial.

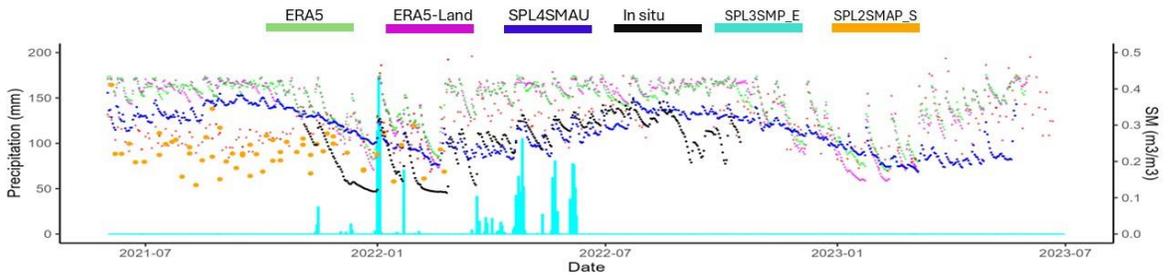
**Apéndice 11.5.** Dinámica de la SSM Diaria. SM07. Matorral



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	722	0.0721	-34.70	0.72	0.49	
ERA5-Land	722	0.0688	-42.20	0.79	0.44	
SPL2SMAP_S	52	0.0858	282.90	0.25	-2.13	
SPL3SMP_E	351	0.0748	-23.20	0.21	-0.13	
SPL4SMAU	710	0.0491	9.40	0.86	-0.03	

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

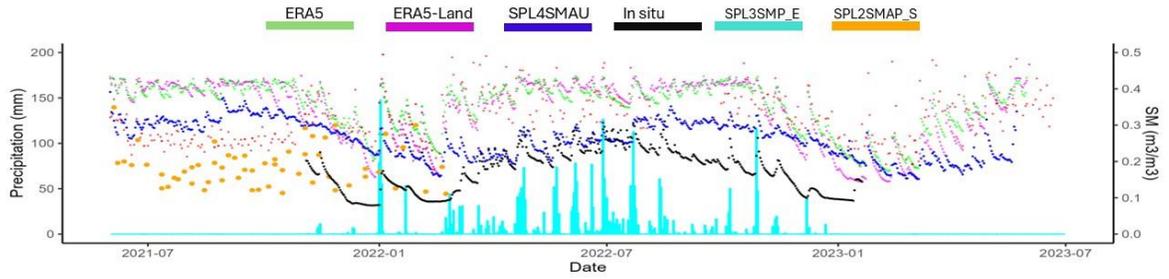
**Apéndice 11.6.** Dinámica de la SSM Diaria. SM10. Bosque Nativo



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	347	0.0465	-32.10	0.75	0.49	
ERA5-Land	347	0.0441	-32.00	0.78	0.58	
SPL2SMAP_S	18	0.0612	-14.40	0.38	0.27	
SPL3SMP_E	173	0.0666	-24.90	0.58	0.51	
SPL4SMAU	343	0.0595	-10.80	0.55	0.27	

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

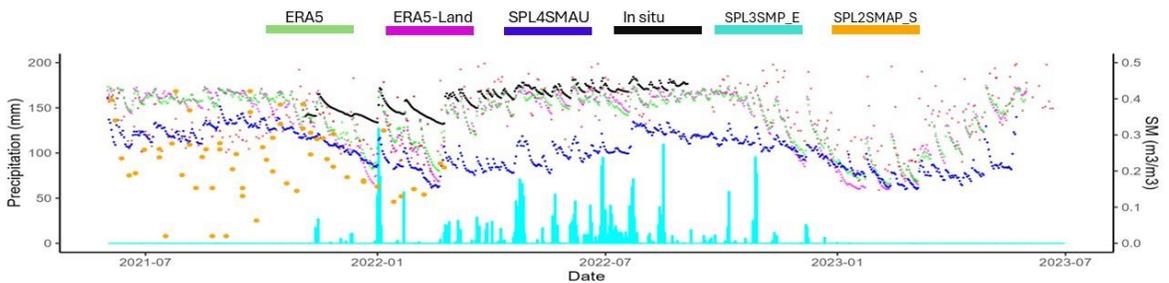
**Apéndice 11.7.** Dinámica de la SSM Diaria. SM11. Bosque Nativo



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	443	0.0422	-50.40	0.75	0.44	
ERA5-Land	443	0.0486	-48.50	0.82	0.41	
SPL2SMAP_S	18	0.0604	-34.50	0.39	0.18	
SPL3SMP_E	243	0.0675	-50.80	0.52	0.27	
SPL4SMAU	439	0.0514	-32.20	0.52	0.22	

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

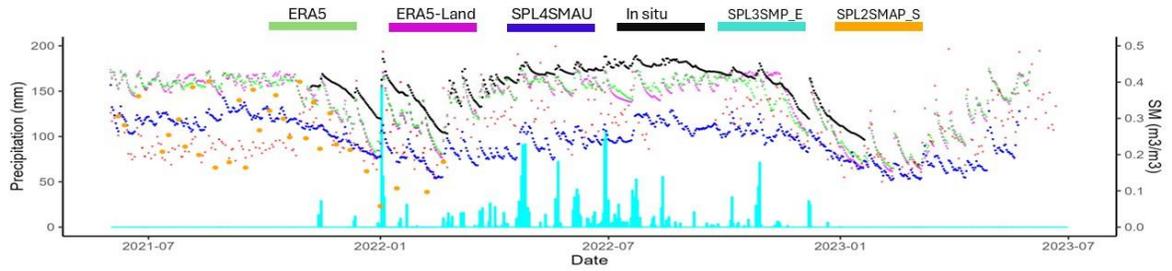
**Apéndice 11.8.** Dinámica de la SSM Diaria. SM13. Bosque Nativo



SSM						
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	
ERA5	304	0.0309	12.60	0.9	0.57	
ERA5-Land	304	0.0408	13.40	0.9	0.47	
SPL2SMAP_S	18	0.0581	69.90	0.45	-0.13	
SPL3SMP_E	168	0.0909	3.80	0.68	0.24	
SPL4SMAU	300	0.0376	61.80	0.51	0.2	

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

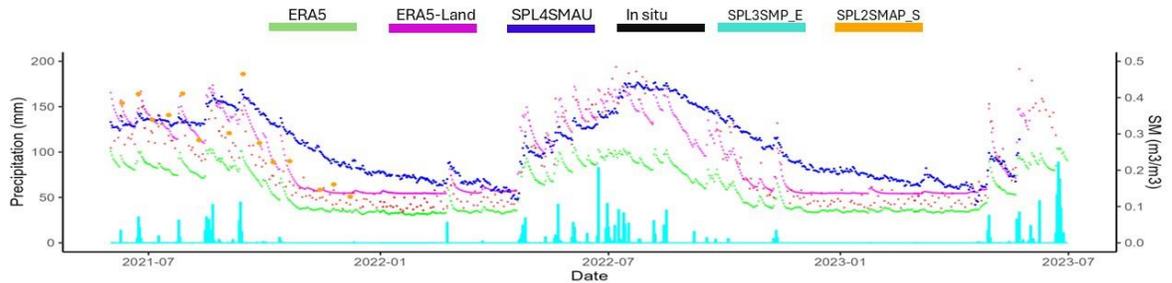
**Apéndice 11.9.** Dinámica de la SSM Diaria. SM14. Bosque Nativo



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	440	0.0259	12.00	0.91	0.82
ERA5-Land	440	0.0333	11.80	0.87	0.76
SPL2SMAP_S	10	0.0686	85.30	0.63	-0.05
SPL3SMP_E	227	0.0638	33.50	0.66	0.42
SPL4SMAU	436	0.0382	65.90	0.74	0.16

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

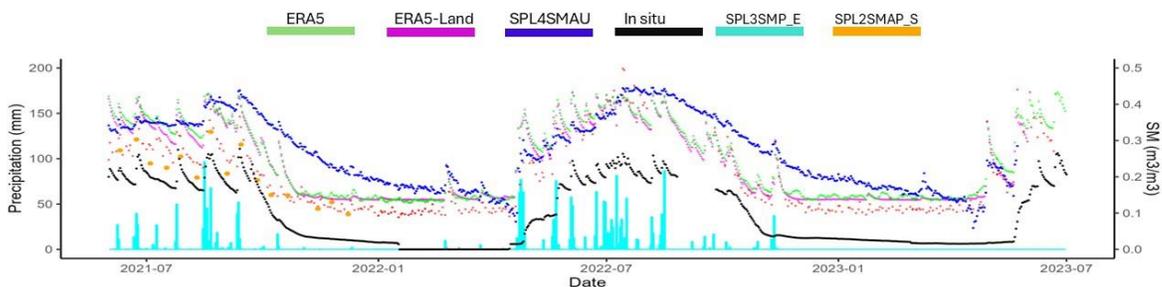
**Apéndice 11.10.** Dinámica de la SSM Diaria. SM17. Agricultura



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	573	0.0391	62.40	0.91	0.23
ERA5-Land	573	0.0395	1.00	0.92	0.84
SPL2SMAP_S	16	0.0709	-7.50	0.91	0.6
SPL3SMP_E	269	0.0523	18.20	0.86	0.71
SPL4SMAU	573	0.0448	-11.30	0.87	0.81

**SSM:** Humedad del suelo superficial.

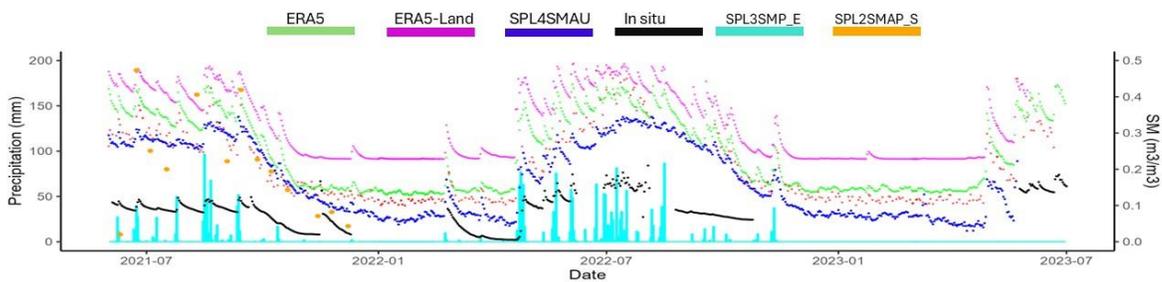
### Apéndice 11.11. Dinámica de la SSM Diaria. SM19. Matorral



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	1479	0.0511	-61.90	0.88	0.33
ERA5-Land	1449	0.0507	-61.30	0.88	0.34
SPL2SMAP_S	68	0.0295	-36.60	0.94	0.6
SPL3SMP_E	730	0.0514	-54.90	0.87	0.4
SPL4SMAU	1438	0.0492	-66.20	0.88	0.3

SSM: Humedad del suelo superficial.

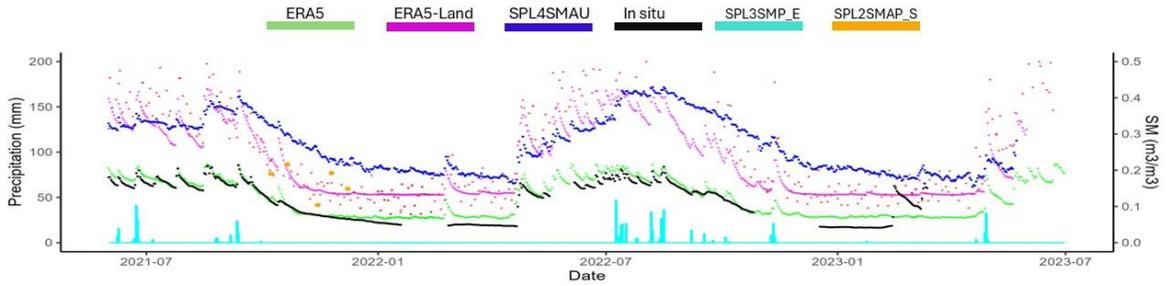
### Apéndice 11.12. Dinámica de la SSM Diaria. SM21. Matorral



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	1229	0.0700	-69.30	0.74	0.18
ERA5-Land	1199	0.0643	-77.30	0.72	0.13
SPL2SMAP_S	575	0.0734	-63.70	0.75	0.22
SPL3SMP_E	1191	0.0627	-58.60	0.8	0.29
SPL4SMAU	65	0.1445	-64.70	0.56	0.03

SSM: Humedad del suelo superficial.

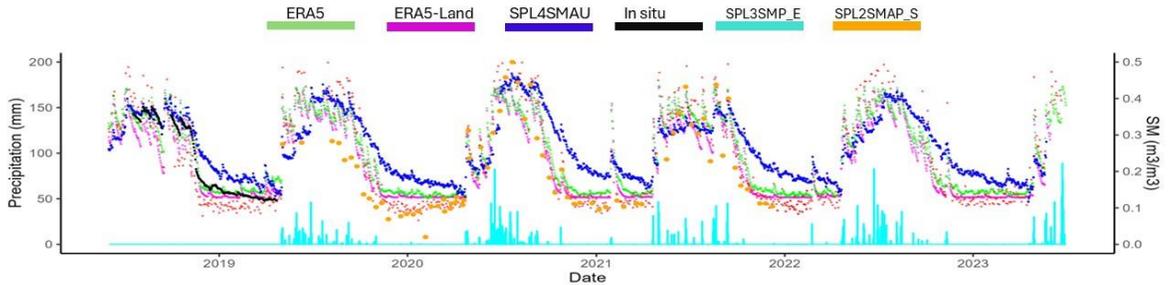
### Apéndice 11.13. Dinámica de la SSM Diaria. SM23. Plantación Forestal



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	1496	0.0220	-19.30	0.9	0.78
ERA5-Land	1496	0.0605	-58.20	0.9	0.22
SPL2SMAP_S	64	0.1776	-70.80	0.85	-0.05
SPL3SMP_E	709	0.1113	-63.40	0.87	0.06
SPL4SMAU	1492	0.0559	-65.30	0.83	0.19

SSM: Humedad del suelo superficial.

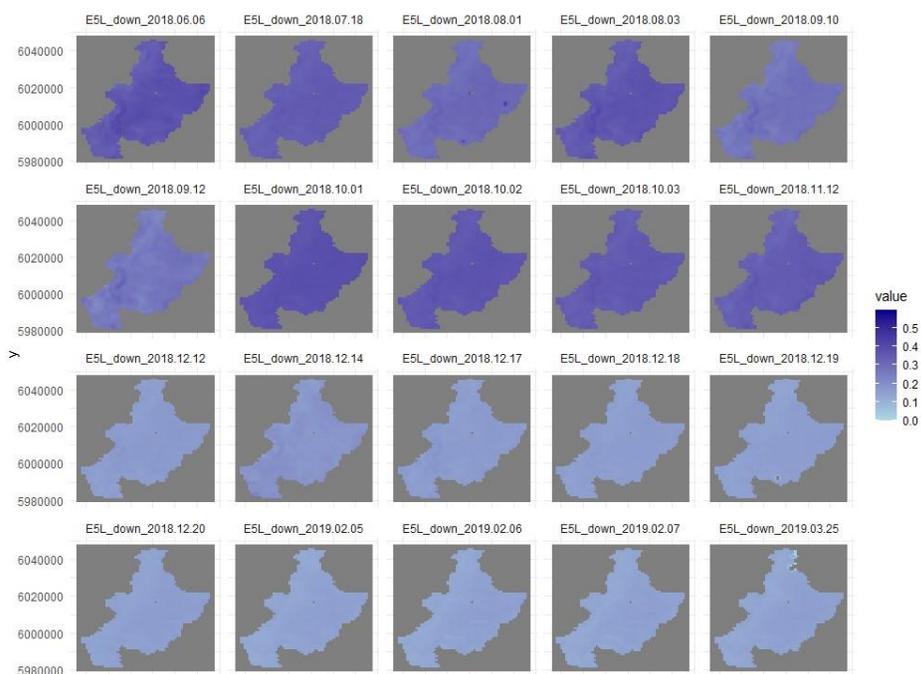
### Apéndice 11.14. Dinámica de la SSM Diaria. SM24. Plantación Forestal



SSM					
PROD	N	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
ERA5	263	0.0262	-2.30	0.97	0.9
ERA5-Land	263	0.0334	8.30	0.95	0.8
SPL2SMAP_S	-	-	-	-	-
SPL3SMP_E	129	0.0416	14.10	0.93	0.8
SPL4SMAU	263	0.0259	-13.80	0.98	0.75

SSM: Humedad del suelo superficial.

## Apéndice 12. Imágenes ERA5-Land desescaladas con GWR



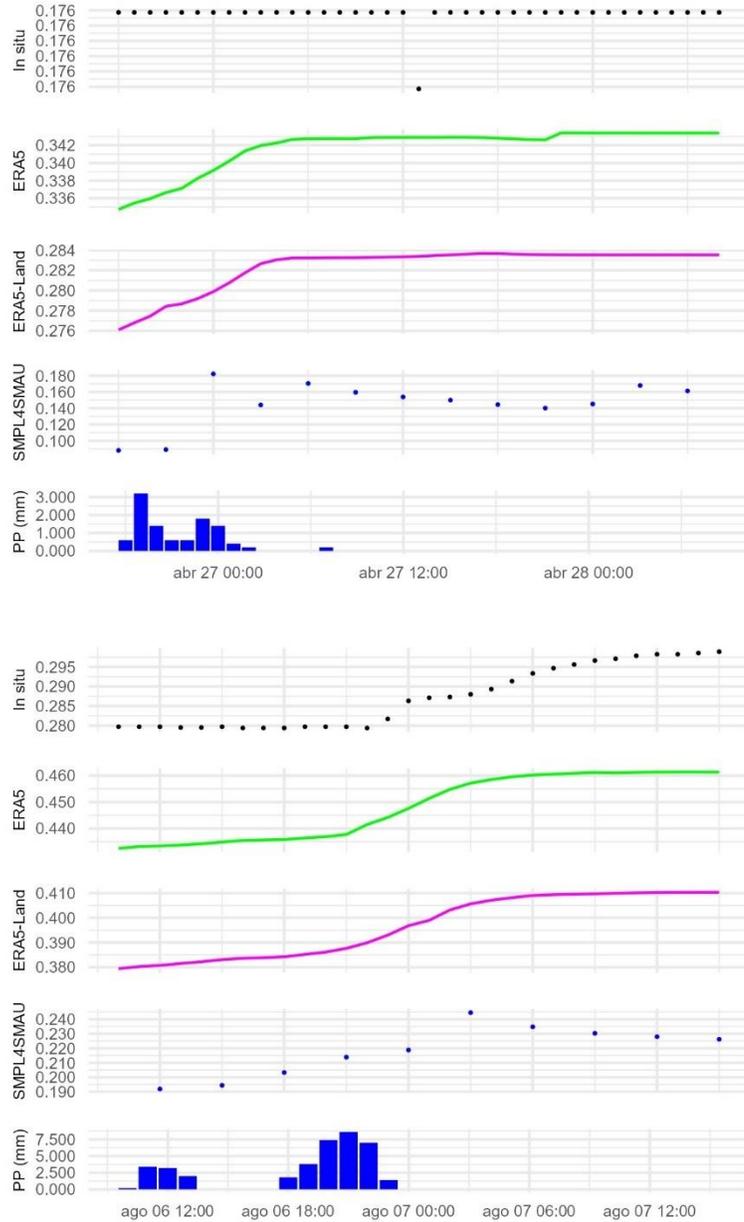
## Apéndice 13. Promedio métricas de bondad estacionales.

Estación	SSM					RZSM			
	PROD	ubRMSE	PBIAS	r	KGE	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
<b>Invierno</b>	ERA5	0,0421	-21,88	0,45	0,17	0,0402	-19,23	0,45	0,16
	ERA5-Land	0,0457	-26,72	0,38	0,03	0,0449	-23,85	0,35	0,06
	SPL4SMAU	0,0428	29,33	0,38	-0,39	0,0398	34,83	0,32	-0,28
<b>Primavera</b>	ERA5	0,0395	-23,26	0,75	0,15	0,0369	1,06	0,74	0,29
	ERA5-Land	0,0463	-35,49	0,77	-0,04	0,0438	-12,43	0,75	0,19
	SPL4SMAU	0,0224	17,80	0,75	-0,30	0,0199	56,87	0,74	-0,31
<b>Verano</b>	ERA5	0,0241	-24,05	0,09	-0,21	0,0291	10,98	0,03	-0,43
	ERA5-Land	0,0247	-31,23	0,20	-0,48	0,0305	0,30	0,18	-0,39
	SPL4SMAU	0,0202	4,57	0,34	-0,14	0,0191	49,04	0,39	-0,28
<b>Otoño</b>	ERA5	0,0395	-31,23	0,58	0,17	0,0453	-16,27	0,23	-0,13
	ERA5-Land	0,0441	-37,64	0,57	0,10	0,0508	-24,55	0,26	-0,13
	SPL4SMAU	0,0270	6,88	0,52	0,10	0,0271	31,63	0,28	-0,15

**SSM:** Humedad del suelo superficial. **RZSM:** Humedad del suelo en la zona de las raíces

**Apéndice 14.1.** Caracterización eventos de precipitación. SM01. Bosque Nativo

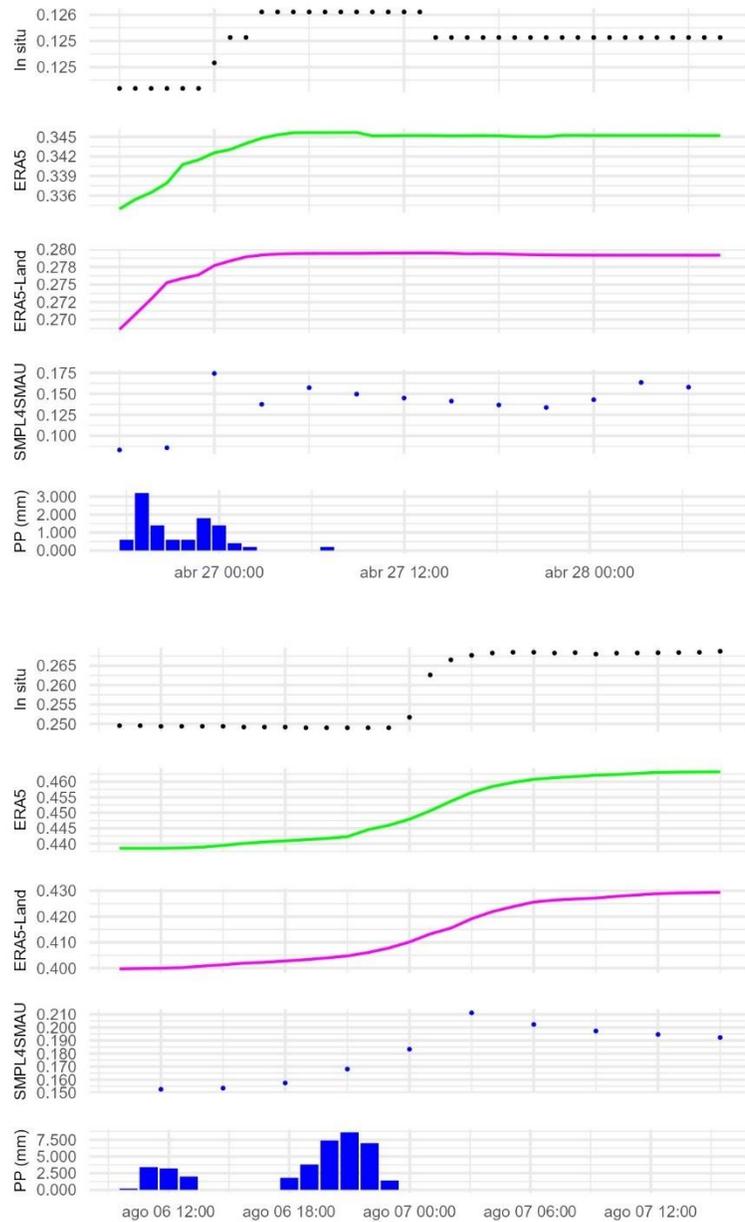
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-04-26 18:00:00	2022-04-27 07:00:00	10,4	10	1,04	2022-04-28 08:00:00	36
2	2022-08-06 10:00:00	2022-08-06 12:00:00	38,8	10	3,88	2022-08-07 15:00:00	27



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

**Apéndice 14.2.** Caracterización eventos de precipitación. SM02. Matorral

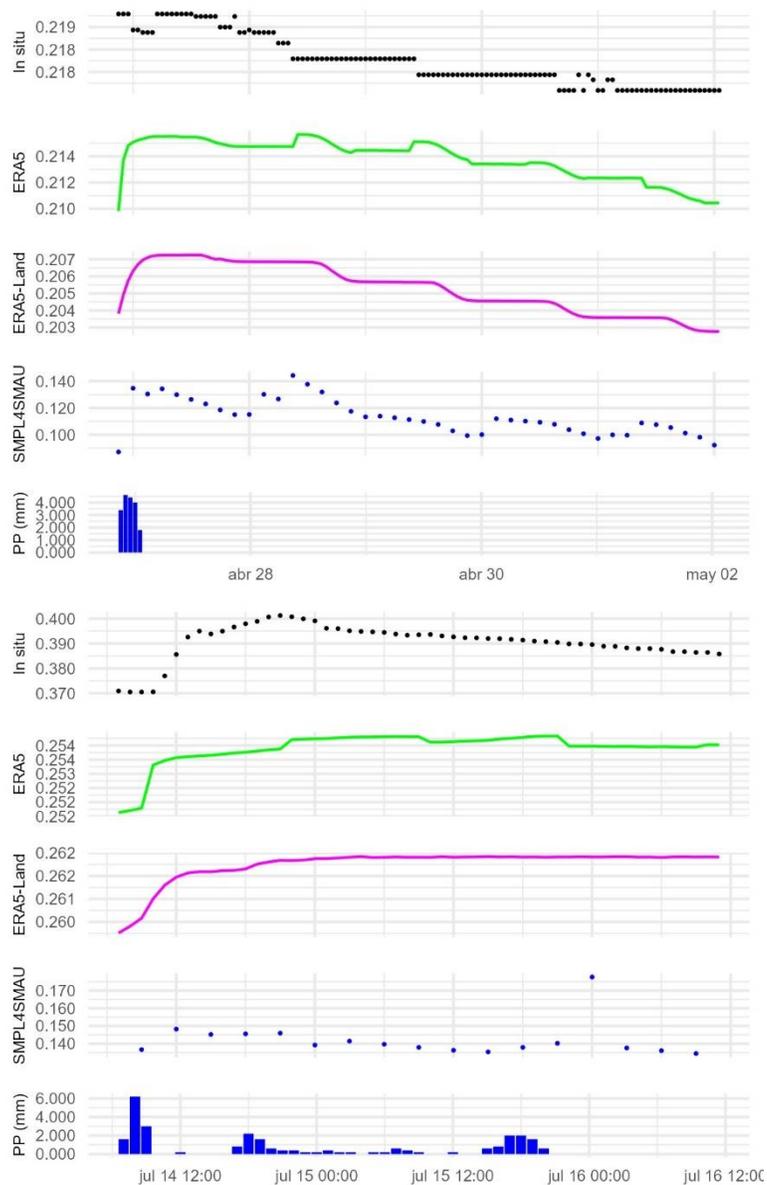
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-04-26 18:00:00	2022-04-27 07:00:00	10,4	10	1,04	2022-04-28 08:00:00	36
2	2022-08-06 10:00:00	2022-08-06 12:00:00	38,8	10	3,88	2022-08-07 15:00:00	27



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.3. Caracterización eventos de precipitación. SM04. Matorral

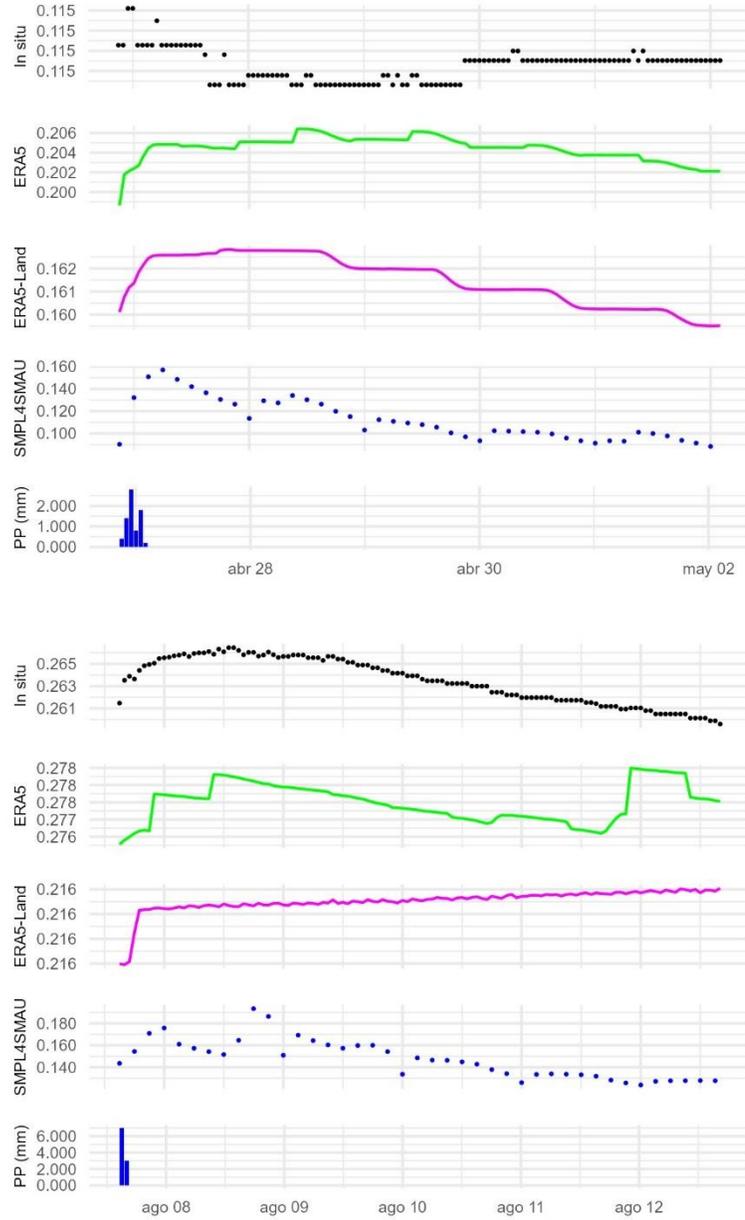
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-04-26 21:00:00	2022-04-27 01:00:00	18,2	5	3,64	2022-05-02 01:00:00	125
2	2022-07-14 07:00:00	2022-07-14 12:00:00	11,0	4	2,75	2022-07-16 11:00:00	52



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

**Apéndice 14.4.** Caracterización eventos de precipitación. SM05. Matorral

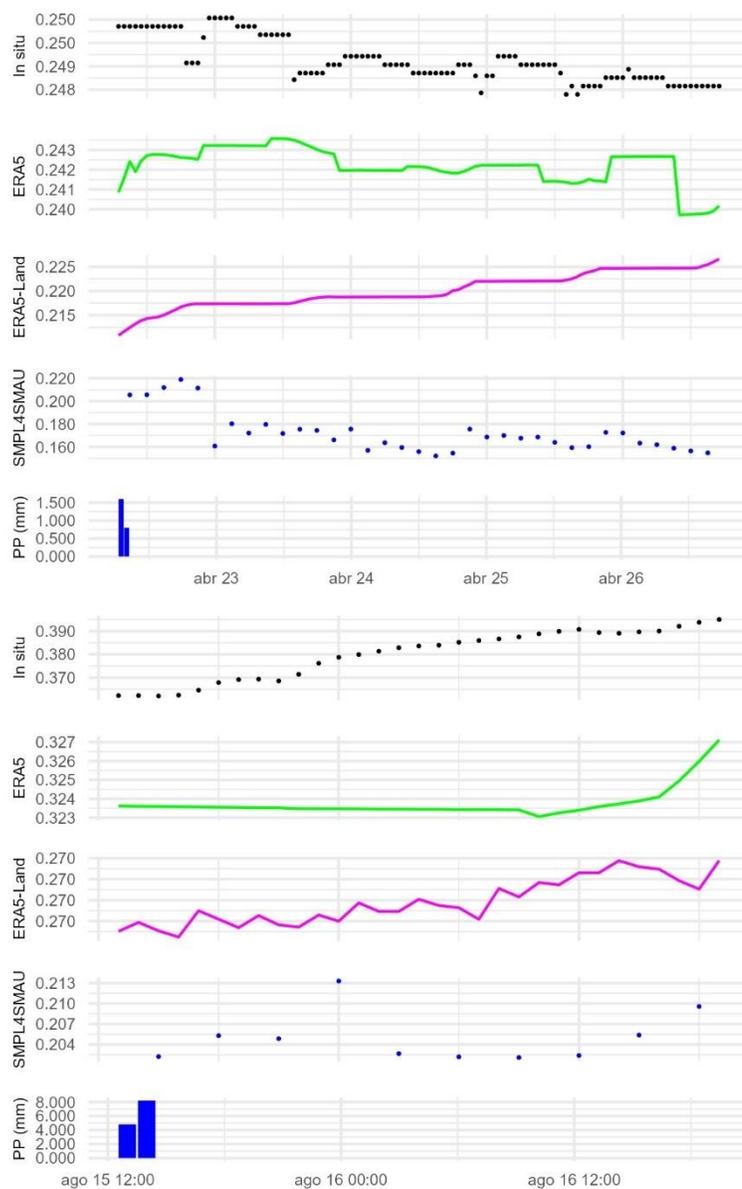
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-04-26 21:00:00	2022-04-27 02:00:00	7,4	6	1,23	2022-04-27 17:00:00	125
2	2022-08-07 15:00:00	2022-08-07 16:00:00	10	2	5	2022-08-16 19:00:00	183



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.5. Caracterización eventos de precipitación. SM07. Matorral

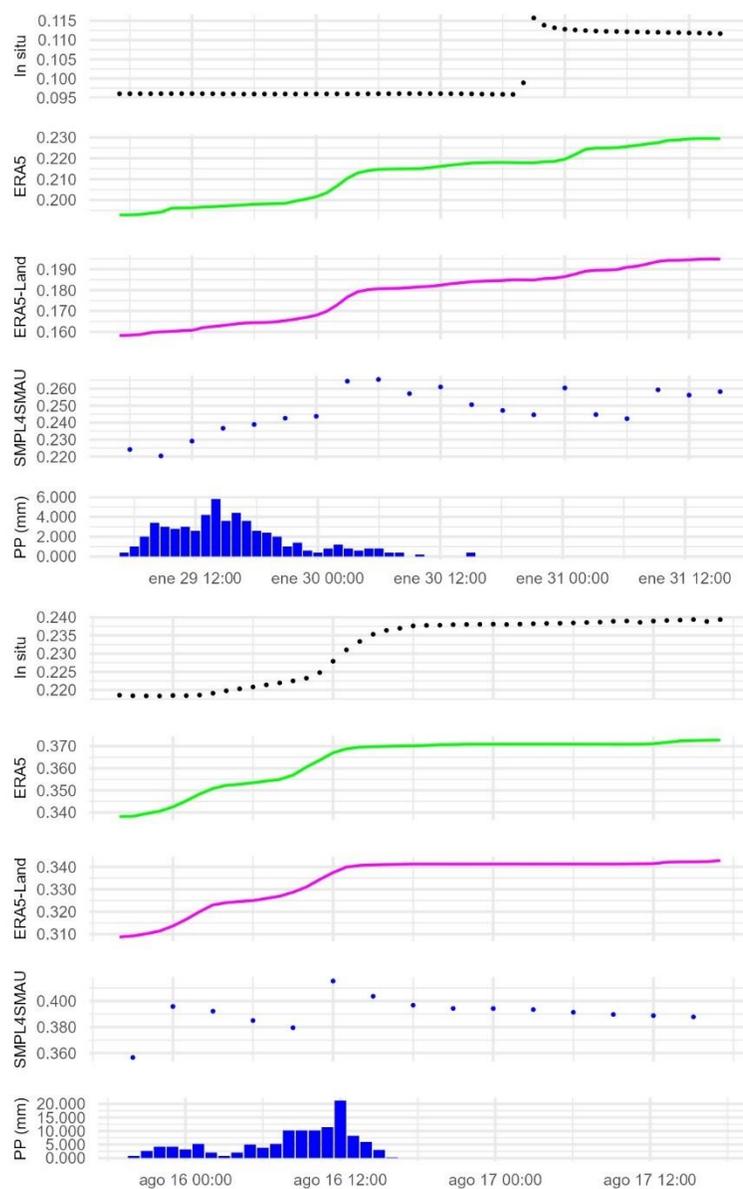
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-04-22 07:00:00	2022-04-22 08:00:00	2,4	2	1,2	2022-04-26 17:00:00	108
2	2022-08-15 13:00:00	2022-08-15 14:00:00	13	2	6,5	2022-08-16 19:00:00	32



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.6. Caracterización eventos de precipitación. SM19.

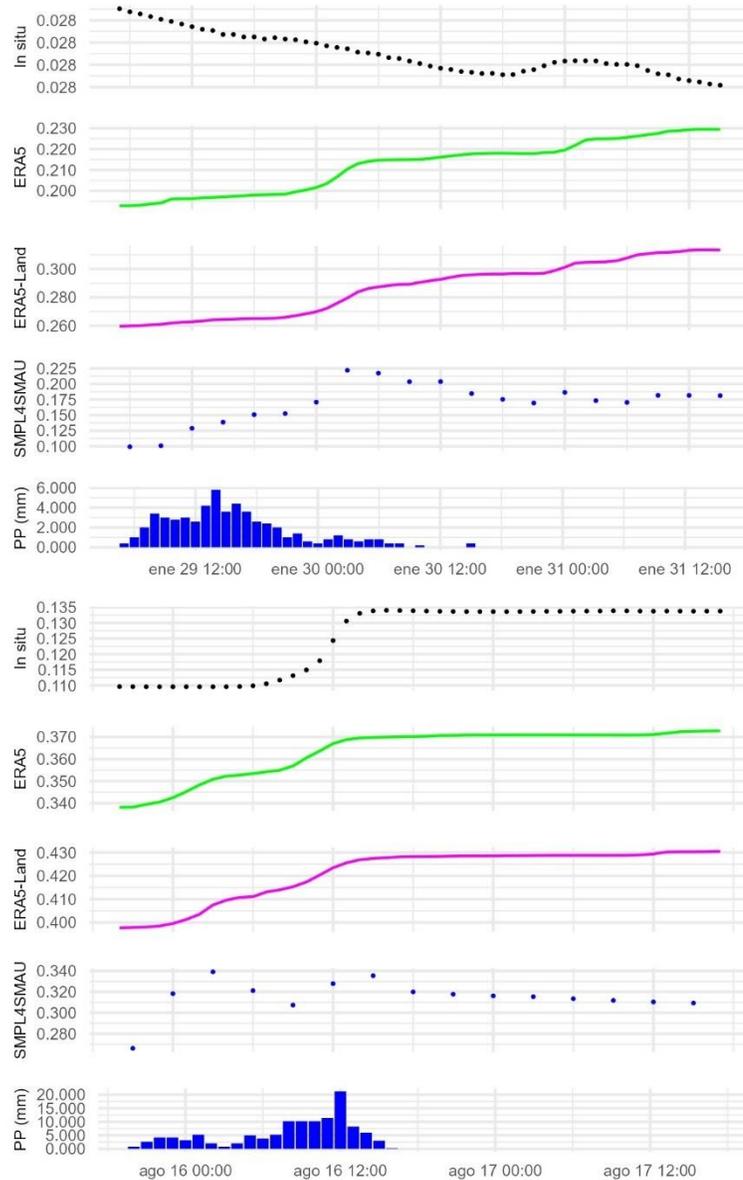
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2021-01-29 05:00:00	2021-01-30 10:00:00	46	31	1,48	2021-02-04 14:00:00	164
2	2021-08-15 20:00:00	2021-08-16 16:00:00	119,6	21	5,69	2021-08-17 17:00:00	37



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.7. Caracterización eventos de precipitación. SM21.

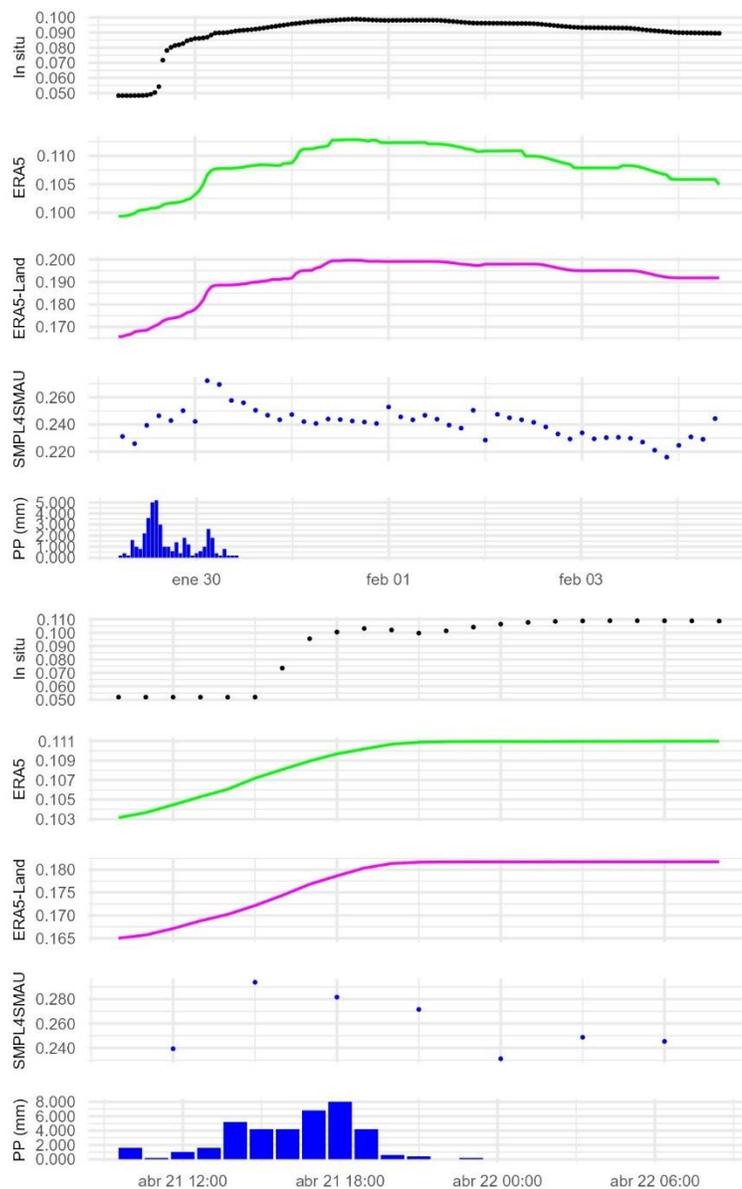
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2021-01-29 08:00:00	2021-01-30 14:00:00	56,2	31	1,938	2021-01-31 15:00:00	59
2	2021-08-15 20:00:00	2021-08-16 16:00:00	119,6	21	5,69	2021-08-17 17:00:00	37



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.8. Caracterización eventos de precipitación. SM23.

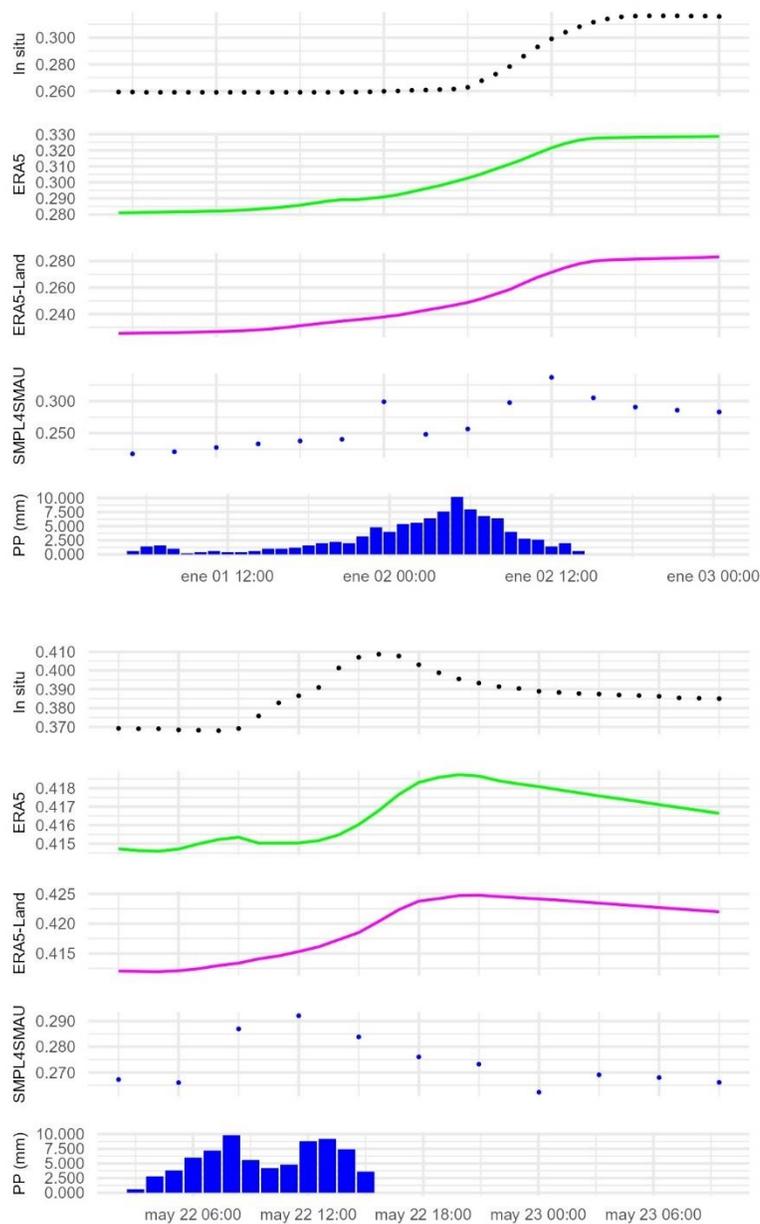
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2021-01-29 05:00:00	2021-01-30 10:00:00	39,2	30	1,3	2021-02-04 10:00:00	196
2	2021-04-21 10:00:00	2021-04-21 23:00:00	38,2	13	2,94	2021-04-22 08:00:00	37



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.9. Caracterización eventos de precipitación. SM11. Pradera

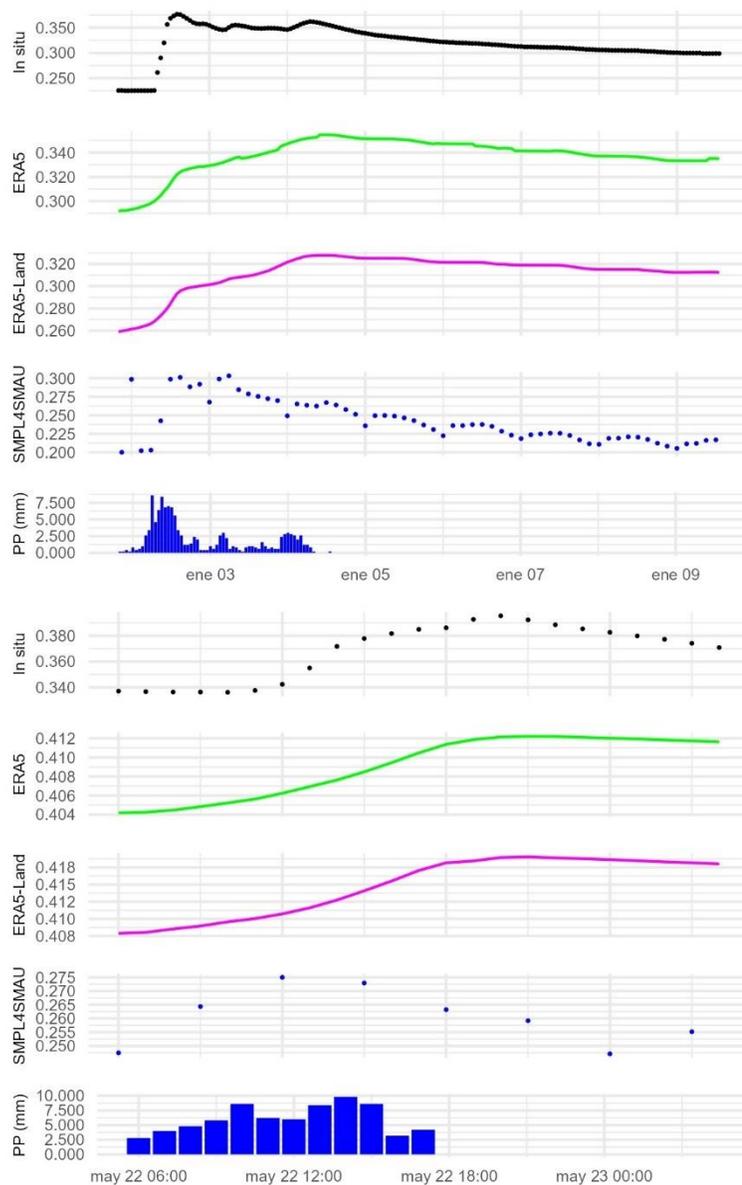
Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-01-01 05:00:00	2022-01-02 14:00:00	100	34	2,94	2022-01-03 00:00:00	45
2	2022-05-22 03:00:00	2022-05-22 15:00:00	73,8	13	5,67	2022-05-23 09:00:00	30



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

### Apéndice 14.10. Caracterización eventos de precipitación. SM14. Bosque Nativo

Evento	Inicio	Final	Precipitación [mm]	Duración [h]	Intensidad [mm/h]	Inicio Evento Post	Duración total[h]
1	2022-01-01 20:00:00	2022-01-04 13:00:00	124,2	62	2,00	2022-01-09 12:00:00	165
2	2022-05-22 06:00:00	2022-05-22 17:00:00	72,4	12	6,0	2022-05-23 04:00:00	31



**Figura.** Primer evento del año (arriba) y evento más intenso (abajo)

**Apéndice 15.** Firmas de HS sitios (TA: Tiempo ascenso y A: Amplitud).

N	ID_SM	Variable	PRIMER EVENTO		EVENTO INTENSO	
			TA	A	TA	A
1	SM01	SPL4SMAU	6	0,094	6	0,118
	SM01	RZSM <i>In situ</i>	0	0,000	18	0,024
	SM01	ERA5-Land	23	0,008	18	0,022
	SM01	ERA5	28	0,009	18	0,018
2	SM02	SPL4SMAU	6	0,091	6	0,076
	SM02	RZSM <i>In situ</i>	9	0,001	17	0,040
	SM02	ERA5-Land	19	0,011	18	0,017
	SM02	ERA5	15	0,012	18	0,010
3	SM04	SPL4SMAU	36	0,057	41	0,041
	SM04	RZSM <i>In situ</i>	0	0,000	14	0,030
	SM04	ERA5-Land	15	0,003	32	0,002
	SM04	ERA5	37	0,006	38	0,003
4	SM05	SPL4SMAU	9	0,067	11	0,051
	SM05	RZSM <i>In situ</i>	2	0,001	0	0,000
	SM05	ERA5-Land	23	0,003	18	0,001
	SM05	ERA5	37	0,008	21	0,001
5	SM07	SPL4SMAU	11	0,013	29	0,063
	SM07	RZSM <i>In situ</i>	0	0	11	0,019
	SM07	ERA5-Land	106	0,016	52	0,001
	SM07	ERA5	27	0,003	42	0,001
6	SM11	SPL4SMAU	31	0,119	27	0,014
	SM11	RZSM <i>In situ</i>	38	0,057	0	0,000
	SM11	ERA5-Land	43	0,058	0	0,000
	SM11	ERA5	43	0,048	0	0,000
7	SM14	SPL4SMAU	34	0,103	12	0,069
	SM14	RZSM <i>In situ</i>	18	0,151	11	0,060
	SM14	ERA5-Land	65	0,069	13	0,022
	SM14	ERA5	63	0,063	14	0,018
8	SM19	SPL4SMAU	64	0,050	5	0,034
	SM19	RZSM <i>In situ</i>	37	0,020	29	0,031
	SM19	ERA5-Land	75	0,036	17	0,027
	SM19	ERA5	61	0,037	20	0,027
9	SM21	SPL4SMAU	19	0,121	5	0,064
	SM21	RZSM <i>In situ</i>	148	0,012	28	0,020
	SM21	ERA5-Land	100	0,055	23	0,021
	SM21	ERA5	61	0,037	20	0,027
10	SM23	SPL4SMAU	19	0,046	5	0,042
	SM23	RZSM <i>In situ</i>	56	0,051	11	0,040
	SM23	ERA5-Land	54	0,033	17	0,027
	SM23	ERA5	56	0,013	21	0,016

**Apéndice 16.** Métricas de bondad eventos de precipitación.

N	ID_SM	PROD	PRIMER EVENTO (E1)				EVENTO MAS INTENSO (E2)			
			ubRMSE	PBIAS	r	KGE	ubRMSE	PBIAS	r	KGE
1	SM01	SPL4SMAU	NA	NA	NA	NA	0,0121	-24,1	0,74	-0,18
	SM01	ERA5-Land	0,0021	60,7	-0,08	-51,91	0,0054	38,1	0,95	0,31
	SM01	ERA5	0,0025	94,5	-0,08	-60,73	0,0051	56,1	0,95	0,22
2	SM02	SPL4SMAU	0,0257	10,9	0,65	-130,93	0,0128	-30	0,9	-0,25
	SM02	ERA5-Land	0,0028	174,2	0,84	-13,79	0,0038	60,1	0,96	0,35
	SM02	ERA5	0,0023	121,9	0,8	-11,04	0,0026	74,3	0,97	0,25
3	SM04	SPL4SMAU	0,0129	-48	0,59	-20,66	0,0113	-63,7	0,09	-0,2
	SM04	ERA5-Land	0,0012	-2	0,71	-0,61	0,0070	-33	0,73	-0,04
	SM04	ERA5	0,0010	-5,9	0,86	-0,49	0,0068	-35	0,74	-0,02
4	SM05	SPL4SMAU	0,0184	-2,5	0,1	-112,31	0,0156	-44,1	0,87	-6,48
	SM05	ERA5-Land	0,0013	78,3	-0,58	-5,93	0,0021	-18	-0,42	-0,73
	SM05	ERA5	0,0011	40,9	-0,34	-4,86	0,0020	5,3	0,24	-0,05
5	SM07	SPL4SMAU	0,0184	-2,5	0,1	-112,31	0,0156	-44,1	0,87	-6,48
	SM07	ERA5-Land	0,0013	78,3	-0,58	-5,93	0,0021	-18	-0,42	-0,73
	SM07	ERA5	0,0011	40,9	-0,34	-4,86	0,0020	5,3	0,24	-0,05
6	SM11	SPL4SMAU	0,0248	-4,7	0,71	0,47	0,0140	-29,1	0,19	0,11
	SM11	ERA5-Land	0,0081	8,8	0,96	0,76	0,0095	8,5	0,68	0,32
	SM11	ERA5	0,0063	-10	0,97	0,87	0,0113	7,8	0,63	0,04
7	SM14	SPL4SMAU	0,0262	5,3	0,64	0,34	0,0250	-28,8	-0,1	-0,27
	SM14	ERA5-Land	0,0271	-2,6	0,58	0,35	0,0178	12,8	0,94	0,18
	SM14	ERA5	0,0258	-24,5	0,66	0,56	0,0189	11,2	0,94	0,13
8	SM19	SPL4SMAU	0,0131	142,9	0,27	-0,72	0,0122	69	0,35	-0,03
	SM19	ERA5-Land	0,0084	109,1	0,73	-0,27	0,0042	44,4	0,93	0,48
	SM19	ERA5	0,0085	75,5	0,72	0,01	0,0042	57	0,94	0,35
9	SM21	SPL4SMAU	0,0328	508,5	-0,72	-140,71	0,0176	151,6	0,17	-0,79
	SM21	ERA5-Land	0,0188	927,9	-0,93	-80,48	0,0036	235,5	0,95	-1,36
	SM21	ERA5	0,0124	660,5	-0,94	-52,26	0,0038	189,5	0,94	-0,9
10	SM23	SPL4SMAU	0,0156	166,5	0,12	-0,89	0,0371	188,5	-0,3	-1,29
	SM23	ERA5-Land	0,0055	112,3	0,92	-0,16	0,0180	97,5	0,97	-0,23
	SM23	ERA5	0,0095	19,9	0,86	0,25	0,0212	21,4	0,95	0,08

**Apéndice 17.1.** Clasificación función densidad de probabilidad

<b>N</b>	<b>ID</b>	<b>Sonda</b>	<b>ERA5</b>	<b>ERA5-Land</b>	<b>SPL4SMAU</b>
<b>1</b>	SM01	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Unimodal
<b>2</b>	SM02	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Unimodal
<b>3</b>	SM04	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Unimodal
<b>4</b>	SM05	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Unimodal
<b>5</b>	SM07	Bimodal	Trimodal	Bimodal	Bimodal
<b>6</b>	SM11	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal
<b>7</b>	SM14	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Unimodal
<b>8</b>	SM19	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal
<b>9</b>	SM21	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal
<b>10</b>	SM23	Bimodal	Bimodal	Bimodal	Bimodal

**Apéndice 17.2.** Punto de marchitez Permanente.

<b>PMP</b>			<b>PMP estimado</b>			
<b>N</b>	<b>ID</b>	<b>ChSPD</b>	<b>Sonda</b>	<b>ERA5</b>	<b>ERA5-Land</b>	<b>SPL4SMAU</b>
<b>1</b>	SM01	0,18	0,27	0,18	0,28	NA
<b>2</b>	SM02	0,12	0,22	0,13	0,25	NA
<b>3</b>	SM04	0,18	0,28	0,22	0,36	NA
<b>4</b>	SM05	0,10	0,19	0,12	0,25	NA
<b>5</b>	SM07	0,17	0,18	NA	0,22	0,10
<b>6</b>	SM11	0,24	0,34	0,32	0,39	0,31
<b>7</b>	SM14	0,14	0,23	0,26	0,30	NA
<b>8</b>	SM19	0,1	0,15	0,09	0,26	0,20
<b>9</b>	SM21	0,11	0,19	0,03	0,12	0,20
<b>10</b>	SM23	0,14	0,22	0,04	0,13	0,10

**Apéndice 17.3.** Capacidad de campo.

N	ID	CC		CC estimado		
		ChSPD	Sonda	ERA5	ERA5-Land	SPL4SMAU
1	SM01	0,45	0,28	0,45	0,39	NA
2	SM02	0,45	0,25	0,45	0,41	NA
3	SM04	0,25	0,36	0,25	0,26	NA
4	SM05	0,25	0,25	0,25	0,31	NA
5	SM07	0,24	0,27	NA	0,26	0,16
6	SM11	0,40	0,39	0,4	0,41	0,29
7	SM14	0,41	0,33	0,41	0,41	NA
8	SM19	0,36	0,26	0,36	0,32	0,34
9	SM21	0,38	0,12	0,38	0,46	0,33
10	SM23	0,17	0,13	0,17	0,30	0,32

**Apéndice 17.4.** Agua disponible para las plantas.

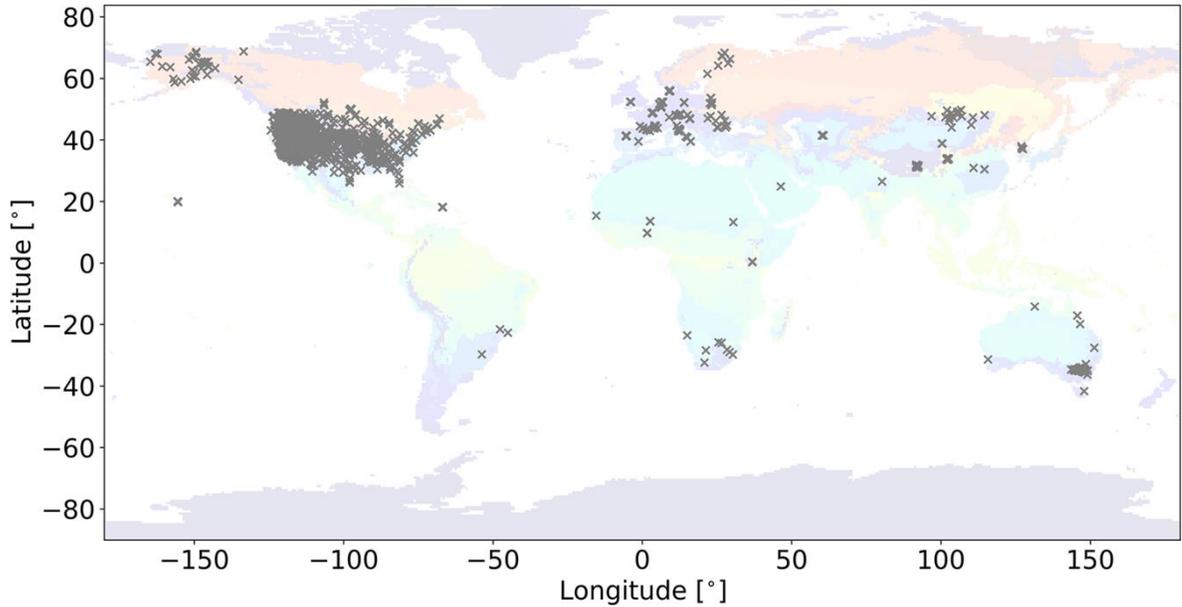
N	ID	ADP		ADP estimado		
		ChSPD	Sonda	ERA5	ERA5-Land	SPL4SMAU
1	SM01	0,09	0,11	0,12	0,11	NA
2	SM02	0,1	0,12	0,11	0,13	NA
3	SM04	0,1	0,13	0,04	0,06	NA
4	SM05	0,09	0,13	0,05	0,17	NA
5	SM07	0,07	0,08	NA	0,04	0,06
6	SM11	0,11	0,07	0,91	0,14	0,03
7	SM14	0,1	0,07	0,09	0,11	NA
8	SM19	0,06	0,17	0,15	0,15	0,15
9	SM21	0,08	0,09	0,19	0,19	0,25
10	SM23	0,08	0,09	0,07	0,13	0,12

**Apéndice 18.** Firmas HS (Fecha de transición y Tiempo de transición)

N	ID	Cuenca	LC	Sonda	Fecha de transición [Día juliano]			Tiempo de transición [Días]			
					ERA5	ERA5- Land	SPL4SMAU	Sonda	ERA5- Land	E5L	SPL4SMAU
1	SM01	Petorca	BN	174	117	195	NA	25	80	46	NA
2	SM02	Petorca	MAT	195	155	158	NA	13	50	47	NA
3	SM04	Petorca	MAT	191	154	191	NA	2	41	44	NA
4	SM05	Petorca	MAT	183	155	206	NA	10	106	37	NA
5	SM07	Mapocho	MAT	117	NA	137	92	79	NA	60	20
6	SM19	Cauquenes	MAT	91	91	113	NA	23	35	27	22
7	SM21	Cauquenes	MAT	66	92	93	NA	46	50	52	NA
8	SM23	Cauquenes	PF	91	111	91	110	31	40	31	11
9	SM11	Trancura	BN	113	91	91	110	9	30	31	12
10	SM14	Trancura	BN	111	111	110	64	10	48	41	11

## 9. ANEXOS

**Anexo 1.** Distribución espacial estaciones de HS actuales de la ISMN.



Fuente: Han et al., 2023

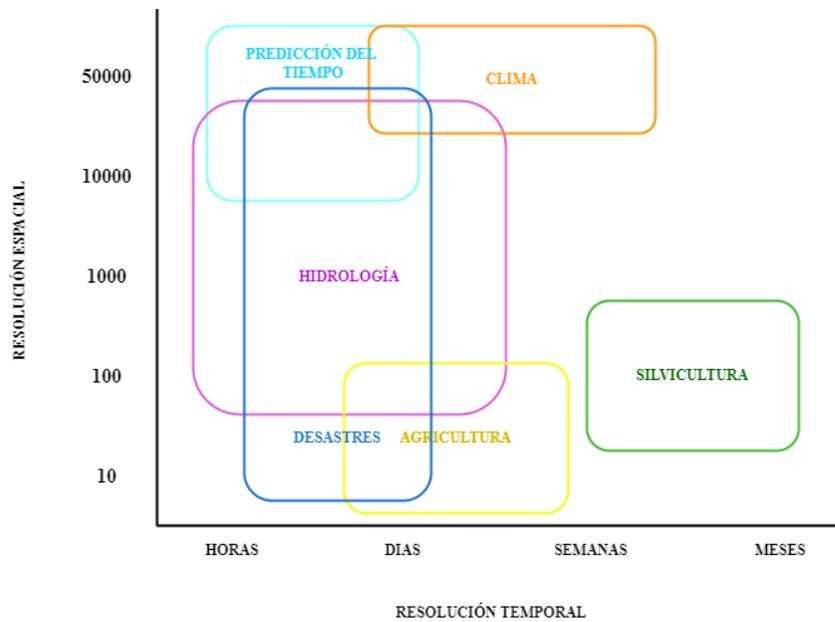
**Anexo 2.** Resumen productos grillados de HS

Tipo	Acrónimo	Sensor	Resolución espacial	Resolución temporal	Rango cobertura	Latencia
Productos satelitales	AMSR2	Microonda pasivo	~ 47 km	1–3 d	2012– presente	~ 1.5 d
	ASCAT	Microonda activo	~ 30 km	1–2 d	2007– presente	2–4 meses
	SPL3SMP_EE	Microonda pasivo	~ 9 km	1–3 d	2015– presente	~ 2 d
	SMOS	Microonda pasivo	~ 40 km	1–3 d	2010– presente	~ 12 h
	ESA-CCI	Microonda activo/pasivo	0.25°	Diario	1978–2018	~ 1 año
	MeMo	Microonda pasivo	0.1°	3-horas	2015– presente	~ 12 h
Modelos sin asimilación datos de	ERA5-Land	-	0.1°	Horario	1979– presente	2–3 meses
	GLDAS-Noah	-	0.25°	3-horas	1948–2020	~ 4 meses
	HBV-ERA5	-	0.28°	3-horas	1979– presente	~ 6 d
	HBV-IMERG	-	0.1°	3-horas	2000– presente	~ 3 h
	HBV-MSWEP	-	0.1°	3-horas	2000– presente	~ 3 h

Modelos con asimilación de datos de HS	VIC-PGF	-	0.25°	Diario	1950–2016	Varios años
	ERA5	Microonda activo	0.28°	Horario	1979–2020	~ 6 d
	GLEAM	Microonda activo/pasivo	0.25°	Diario	1980–2018	6–12 meses
	HBV-ERA5+SPL3SMP_EE	Microonda activo/pasivo	0.1°	3-horas	2015–2020	~ 6 d
	HBV-IMERG+SPL3SMP_EE	Microonda activo/pasivo	0.1°	3-horas	2015–presente	~ 2 d
	HBV-MSWEP+SPL3SMP_EE	Microonda activo/pasivo	0.1°	3-horas	2015–presente	~ 2 d
	SPL4SMAU	Microonda pasivo	9 km	3-horas	2015–presente	~ 2 d

Fuente: Elaboración propia en base a Beck et al., 2021

**Anexo 3.** Resumen de requisitos aproximados de resolución espacial y temporal con relación a diferentes campos de aplicación de los productos de HS



Fuente: Elaboración propia en base a i) Peng et al., 2020 ii) Rabiei et al., 2021

## 10. FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Proyecto DO210001: *Data Observatory Foundation, Technology Center*.  
Más información se puede encontrar en <https://www.dataobservatory.net/>

ANID NSF 190018: “*Management of global change impacts on hydrological extremes by coupling remote sensing data and an interdisciplinary modelling approach*”.  
Más información se puede encontrar en <https://chi2.ufro.cl/>.

Fondecyt 1212071: “*The catchment’s memory: understanding how hydrological extremes are modulated by antecedent soil moisture conditions in a warmer climate*”.

Fondecyt 1210932: “*Improving forest water yield and productivity quantification at the catchment scale by mapping root depth and eco-physiological thresholds with remote sensing and water transfer modeling*”.



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LA HUMEDAD DE SUELO ESTIMADA MEDIANTE  
PRODUCTOS GRILLADOS EN LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE**

Actividad Formativa Equivalente para optar al Título Profesional de  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en  
Gestión Territorial de Recursos Naturales

**DANIEL ALEJANDRO NÚÑEZ IBARRA**

Directores de AFE

Dr. Mauricio Galleguillos Torres

Dr. Mauricio Zambrano-Bigiarini

Profesores consejeros

Dr. Luis Morales Salinas

Dr. Gerardo Soto Mundaca

Evaluadora externa

Dra. Camila Álvarez-Garretón

SANTIAGO – CHILE

2024