

Estudio de Balance hídrico enfocado a cuencas productivas de Bolivia – Cuenca Piloto del Río Keka

Uziel Luna V^a, Jhon Chura Ch^a

^a Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e investigación hidrológica La Paz, Bolivia

Email: Uziel.luna@senamhi.gob.bo, Jhon.chura@senamhi.gob.bo

INFORMACIÓN

RESUMEN

Palabras clave:

SMAP
Balance Hídrico
Cuenca Productiva
Modelos del suelo

Una cuenca con alto potencial productivo agrícola y ganadero es afectada de maneras muy significativas a través del paso del tiempo, las condiciones climáticas cambiantes generan escenarios poco alentadores que a futuro demandarán proyectos de gestión muy específicos y especializados acerca de la disposición del agua para cubrir el acceso a este líquido fundamental para sostener la vida. Este tipo de estudios pretende generar información técnica a fin de atender las necesidades de agua frente a los distintos escenarios hidroclimáticos en que una determinada cuenca.

Para realizar esta investigación en la cuenca del río Keka, se utilizó teorías conocidas en el campo de la hidrología, que nos ayudó a simular el contenido de agua en el suelo con alta similitud al mostrado en uno de los productos generados por la NASA, esperando llegar a un alto grado de confiabilidad para el Monitoreo y posterior balance Hídrico Superficial.

1 Introducción

El cambio climático trae consigo la alteración de ciclos conocidos y la aparición de fenómenos climáticos poco conocidos en ciertas regiones, esto es altamente visible en registros históricos climáticos a nivel mundial y/o regional, considerando que la alteración de las diversas variables meteorológicas afectadas se producen eventos extremos como sequías, inundaciones y tormentas tropicales. Dicha alteración del clima es el resultado de un desequilibrio a nivel ecológico, energético y económico.

Los efectos del cambio climático manifiestan escenarios de alta severidad y contundencia, es decir, la alteración de un sistema climático genera comportamientos atípicos y preocupante debido a un nuevo comportamiento del clima en una región, incidiendo proporcionalmente sobre sistemas hidrológicos y agrícolas. Bajas cantidades de precipitación, incremento de la temperatura y evaporación de agua son los factores más conocidos y de sencilla interpretación pueden atribuirse como principales factores del cambio climático.

Una de las principales preocupaciones a nivel mundial es el estado del agua y su efecto directo sobre la población, cultivo, ganado, etc. Es de suma importancia conocer el estado del suelo en escenarios futuros considerando su incidencia directa sobre la producción agrícola en el territorio nacional. Realizar un estudio de monitoreo y balance hídrico de las zonas productivas de Bolivia adquiere más y más importancia frente a dichos escenarios de variación climática. Con esta premisa, se propone la generación de información adecuada y oportuna como apoyo técnico a la toma de decisiones.

El conocimiento de la disponibilidad de los recursos naturales resulta ser un factor determinante en el desarrollo del país. Por tanto, una cuantificación del agua superficial y a nivel radicular es ampliamente requerido para el sector productivo del país.

Con el objeto de contar con una herramienta de planeación como apoyo a una toma de decisiones, se plantea el monitoreo y balance de fuentes de agua superficial de manera aplicativa para atender necesidades a lo largo del país, que consiste en el seguimiento, sugerencias de mitigación para la prevención de un fenómeno recurrente (sequía)

Además, dicha disposición de agua permite realizar un análisis de la oferta de una cuenca a través del escurrimiento superficial y sub superficial, también permite conocer si dicha cantidad es suficiente para satisfacer los requisitos o demandas de los diversos proyectos existentes (y por realizar) dentro de la cuenca.

Fue necesario identificar que una mayoría de los municipios pertenecientes a la región altiplánica (altamente productivos) son afectados por eventos relacionados con la disponibilidad de agua. A través de una encuesta realizada a diversos municipios en el departamento de La Paz (entre ellas la cuenca piloto) se pudo identificar bastantes necesidades producto de las crecientes afectaciones a la que están sometidos cada municipio.

Una de las principales observaciones que pudo detectarse es la alta productividad agrícola, siendo una de las principales razones para realizar un estudio detallado del comportamiento de las fuentes de agua superficial existentes, su variabilidad a lo largo de las distintas épocas del año, los factores que inciden sobre el almacenamiento en el suelo, etc.

Finalmente, es fundamental realizar productos intermedios que serán el principal insumo del estudio de balance y monitoreo planteado, estos son:

- Una base de datos meteorológicos con series mensuales completas de las principales variables climatológicas (precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, etc.) que cubra las cuencas de estudio.

- Una base de datos hidrológicos con series de caudales mensuales para cada una de las estaciones hidrométricas (disponibles) ubicadas en la cuenca de estudio, de al menos 10 años de duración.
- Una base de datos geográficos que incluya toda la cartografía temática, la ubicación de estaciones de medición y resultados.
- Modelo precipitación-escurrimiento calibrado y validado, que permita la extensión de las series de caudales de todas las subcuencas con información incompleta.
- Mapas temáticos digitales e impresos que muestren gráficamente los resultados principales: isolíneas de variables climáticas, mapas de coeficientes de escorrentía y caudales específicos, etc.

2 Descripción de la cuenca de estudio

La cuenca del Río Keka forma parte del sistema endorreico de la cuenca del Lago Titicaca cuya ubicación es en dirección noroeste del lago menor. La región presenta características de cuencas de alta montaña correspondiente a la Cordillera Oriental de los Andes.

La delimitación física del ámbito de estudio resulta ser un aspecto determinante en proyectos de planificación y monitoreo. En la mayoría de los casos los límites políticos administrativos de las comunidades, poblaciones, municipios, y/o regiones no coinciden, generando conflictos y malentendidos en el uso del agua u otro recurso natural. A causa de ello la Figura 1 ilustra

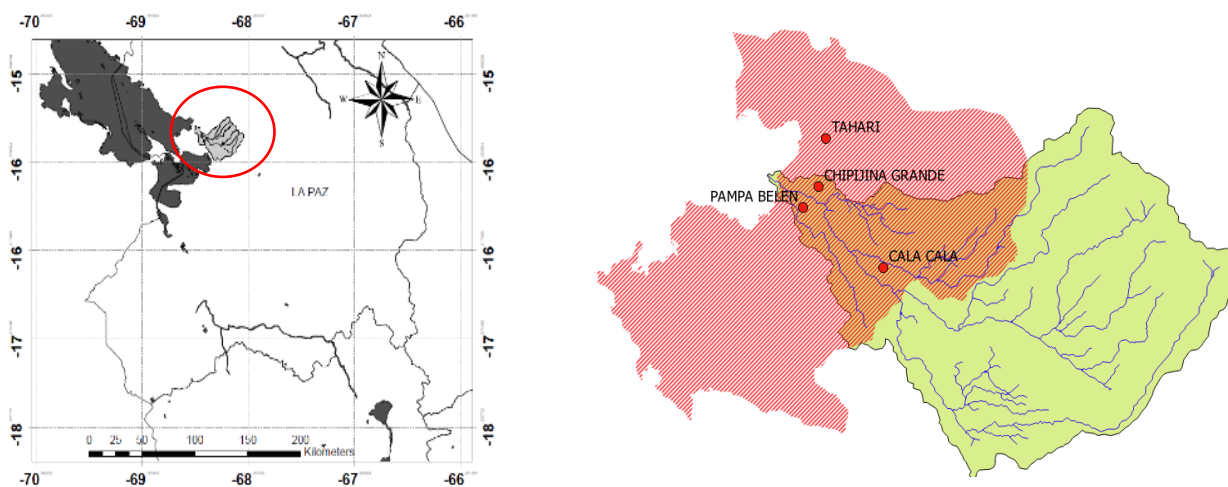


Fig. 1 Delimitación de la cuenca de estudio y su comparativa con los límites del municipio. Detalle de la cuenca de aporte al municipio. Sin escala. Elaboración propia.

Tabla 1

Demanda de agua del cultivo según el área cultivada por producto

Producto	Área cultivada [Ha]	Área cultivada [m2]	Demanda hídric. [l /mes- m2]
Papa	2416.2	24162000	10.93
Cebada en grano	265.6	2656000	28.06
Avena	2045	20450000	15.30
Alfalfa	1496.6	14966000	28.22
haba verde	845.7	8457000	34.16
Oca	214.5	2145000	23.91
Otros	302.6	3026000	38.53

la delimitación de la cuenca del río Keka con respecto del municipio próximo.

3 Metodología

El Estudio de Monitoreo de Fuentes de Agua Superficial es de tipo Cuantitativo, puesto que se busca medir los volúmenes de agua presentes en la superficie. A través de un análisis exhaustivo de los registros históricos de información hidrometeorológica en la cuenca piloto.

De una serie de aproximadamente cinco capas de información: precipitación, escurrimiento, almacenamiento en cuerpo de agua (presas, lagos y lagunas), temperatura, humedad de suelo, esta última es la más subjetiva en su cálculo y análisis. Debido a que existe muy poca información para la correcta observación y análisis de la humedad del suelo, se considera oportuno acudir a la percepción remota satelital para la estimación de la humedad de suelo.

2.1 Datos

2.1.1 Demanda de agua

El dato de la cantidad de agua demandada por una población es fundamental para establecer los lineamientos del estudio con la finalidad de relacionar la información con los requerimientos del consumo humano, la producción sectorial y las demandas esenciales de los ecosistemas no antrópicos. Al tratarse de un estudio piloto de demanda de agua en cuencas productivas, como primera instancia nos enfocamos en el sector agrícola, donde, apuntamos a identificar zonas con alto grado de contenido de agua en el suelo lo cual es ideal para cultivo. Los productos de mayor relevancia, su demanda hídrica y el área cultivada en la cuenca del río Keka son listados en la **Tabla 1**. Estos datos fueron recopilados de distintas fuentes, pero un alto porcentaje fue extraído del *Censo Agropecuario*

Estado Plurinacional de Bolivia, 2013 (Recopilado de distintos años y secciones)

2.1.2 Información hidrometeorológica

Se utilizó información extraída de las bases de datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) La información fue sujeta a procesos de crítica y relleno debido a que las bases de datos del SENAMHI albergan información en bruto.

Los registros de las estaciones empleadas serán sujetas a un análisis exploratorio a fin de verificar la calidad de la información, periodos de cambio, valores atípicos y dispersión; por lo que se decidió utilizar el paquete CLIMATOL en RStudio

2.1.2 Información Satelital

Una plataforma satelital reciente que fue lanzada al espacio y que a la fecha se encuentra en pruebas finales operativas es el Soil Moisture Active Passive (SMAP) cuyos objetivos fundamentales son los de estimar la humedad del suelo y congelamiento o descongelamiento en las mismas áreas que son muestreadas (Entekhabi et al, 2014)

La humedad del suelo se estima mediante una combinación de mediciones de radiómetro y radar. Esta combinación de instrumentos permite obtener una alta precisión y por lo tanto una alta resolución en los mapas globales. El radar envía pulsos de ondas de radio a un punto (spot) sobre la Tierra y registra el eco que se regresa unos cuantos microsegundos después. La potencia y la onda de los ecos se pueden interpretar para indicar el nivel de la humedad del suelo, aún bajo la presencia de niveles moderados de vegetación.

La humedad del suelo es representada con alta claridad en los mapas de humedad superficial y radicular

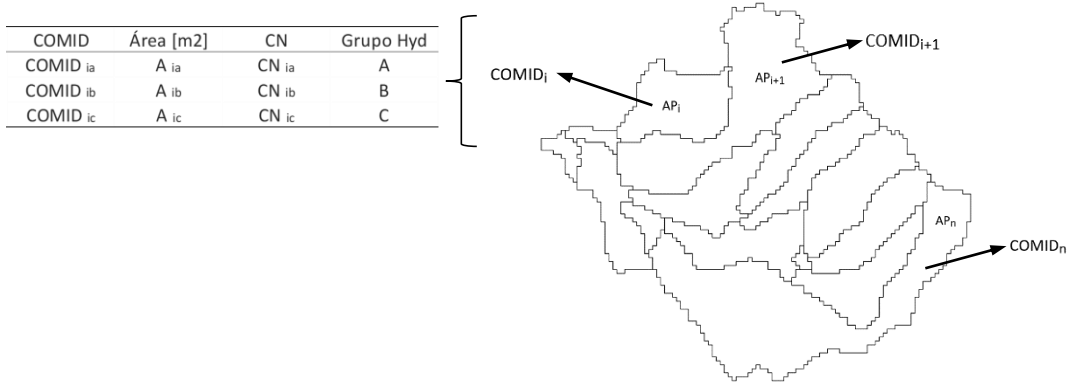


Fig. 2 Distribución de microcuencas consideradas por el modelo UWST. Se muestra también la información que se cuenta en cada microcuenca obtenida de la base de datos del modelo hidrológico HydroBID. Elaboración propia.

obtenidos del visor EOSDIS WORLDVIEW de la NASA.

2.1.3 Modelo de almacenamiento de agua aprovechable

UWST (Usable Water Storage Model) es un modelo Semi Distribuido que simula y analiza el almacenamiento de agua aprovechable en el suelo por microcuenca hasta un metro de profundidad.

Fue desarrollado en la unidad de Estudios e investigación hidrológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) con la finalidad de realizar un análisis específico a las necesidades identificadas en la cuenca, eliminando las variables clásicas de todo balance hídrico (Caudal, evapotranspiración, escurrimiento) y enfocándolo al sector agrícola. Este fue planteado inicialmente en una planilla de Excel y posteriormente fue llevado al lenguaje de programación *R*.

El criterio del planteamiento del modelo considera el suelo como un depósito de almacenamiento considerando tres estados humedad. El modelo UWST mantiene la clasificación de las microcuencas realizadas por el modelo HydroBID (Fig. 2)

El modelo determina la cantidad de agua máxima aprovechable en un metro cuadrado de suelo a un metro de profundidad, los resultados obtenidos por Eq. (1) inicialmente son calculados en centímetros por cada metro cúbico.

$$HA = (CC - PMP) * \frac{D_a}{\rho_{H2O}} * z \quad (1)$$

Donde *CC* representa a la capacidad de campo en función del tipo de suelo existente, *PMP* es el punto de marchitamiento permanente del suelo, *D_a* la densidad

aparente del suelo, ρ_{H2O} la densidad del agua y finalmente *z* la profundidad máxima de análisis.

En función de la densidad aparente el modelo UWST determina un valor de lámina de riego teórico que representa la cantidad de agua en el suelo disponible para los cultivos, Eq. (2)

$$\text{Lámina de riego} = f * HA \quad (2)$$

f es un factor que varía en función del porcentaje de la humedad aprovechable, es decir, si *f* =0.5 se indica que la humedad aprovechable es del 50%. Existen casos en que ciertos cultivos subsisten con humedades aprovechables muy bajas. Este factor dependerá del tipo de suelo y tipo de cultivo propio de la zona.

Para aplicar el modelo UWST se vio por conveniente realizar una discretización de la cuenca en unidades mínimas de análisis (microcuencas) con la finalidad de no generar resultados con alto grado de ponderación, es decir, datos muy generalizados y poco representativos. Por dicha razón se acudió a una base de datos muy completa proporcionada por el BID en su modelo hidrológico HydroBID, donde se establecen códigos de identificación por microcuenca denominados *COMID*. Se destaca la estructura de la información existente en cada microcuenca, siendo necesaria para cualquier estudio hídrico.

El uso de dicha base de datos resultó ser mucho más práctica y ordenada gracias al manejo de microcuencas codificadas, si bien el estudio demanda ser más específico, las salidas de resultados serán mejor interpretadas en etapas posteriores al periodo de calibración y validación.

3 Resultados y discusión

3.1 Balance hídrico

Un modelo hidrológico es la representación físico matemática de una serie de variables presentes en una cuenca, con esta breve definición se realizó un detallado análisis del ingreso y salida de agua en la cuenca del río Keka.

En el desarrollo de este estudio de Balance hídrico se aplicó el modelo HydroBID (proporcionado por el BID) el cual trabaja con información termo-pluviométrica. Los parámetros de entrada principales son a nivel diario estos son la precipitación (en centímetros) y la temperatura (en grados Celsius)

El modelo realiza un análisis distribuido en cada una de sus unidades mínimas identificadas (microcuencas) y a cada una de estas se le establece información de precipitación y temperatura interpolada por el método del inverso de la distancia al cuadrado.

Una de las principales fortalezas de dicho modelo es su base de datos que tiene incorporado, esta base cuenta con información bastante precisa y adecuada para cualquier estudio de balance hídrico. Si bien el modelo cuenta con bastantes parámetros de calibración, una gran mayoría de estos interactúa directamente con la base.

El modelo HydroBID permite ajustar el número de curva en cada microcuenca a través de un factor multiplicador, de la misma manera los coeficientes de escurrimiento y la percolación son ajustados.

3.1.1 Calibración

Durante el proceso de calibración se decidió partir con los valores de los parámetros recomendados en las fichas técnicas proporcionadas por el BID (Moreda, 2014) Con esta consideración y a través de un aprueba de sensibilidad, se procedió a variar de manera cuidadosa cada parámetro a fin de evitar resultados muy alejados de la realidad o muy forzados (con buenos coeficientes de correlación) Debido a que no se cuenta con rangos permisibles en el rango de ajuste de cada uno de estos parámetros esta consideración fue adoptada, además siempre se tuvo el cuidado de mantener los límites físicos que representa cada parámetro mencionado.

Acorde a la disposición de información hidrológica (caudales diarios) hasta el año 2018, el proceso de análisis del balance hídrico fue realizado en dos etapas: calibración en el periodo 2000- 2018 y simulación (caudales) hasta el año 2022 (Fig. 3)

3.2 Simulación del almacenamiento de agua, modelo UWST

Realizando una simulación de eventos de carga y descarga de agua en el suelo de la cuenca del río Keka hasta finales del año 2022.

El periodo comprendido entre los meses de mayo a diciembre son escenarios simulados en base a precipitaciones generadas. Un valor de 120 litro por metro cuadrado representa 120 litros de agua excedente

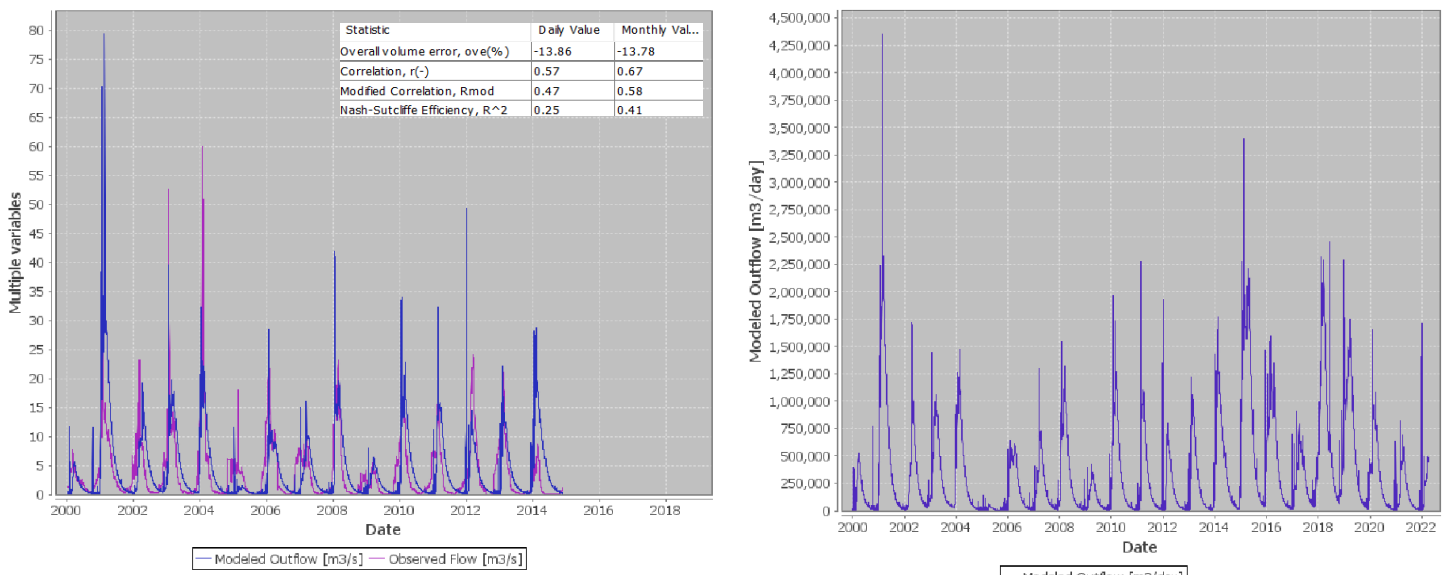


Fig. 3 Resultados del proceso de calibración (izquierda) y simulación (derecha) obtenido con el modelo hidrológico HydroBID.

(acumulado a lo largo del mes) con respecto a la cantidad máxima de agua aprovechable del suelo, es decir, la cantidad de agua precipitada fue más que suficiente para satisfacer la demanda hídrica del cultivo. Siendo esto un escenario favorable.

Acorde a la codificación utilizada, las microcuencas en la parte bajan (a la salida) son los que muestran escenarios de alta descarga de agua, siendo esto un panorama muy peculiar con respecto a la retención de agua en la parte baja de la cuenca, lo cual es representado con alta claridad en los mapas de humedad obtenidos del visor EOSDIS WORLDVIEW de la NASA.

Se pueden apreciar dos variables de salida del modelo UWST, el volumen de agua almacenado en la microcuenca y el volumen de agua aprovechable por el cultivo.

3.4 Soil Moisture Active Passive (SMAP)

La información proporcionada en el producto smap-L4 fue procesada en R utilizando el paquete “*smapr*” que permite identificar, filtrar, descargar, visualizar y exportar información de humedad por pixel. Dos tipos de humedad son considerados en el producto SMAP-L4: “*sm_surface*” y “*sm_rootzone*” los cuales se ajustan a las consideraciones iniciales del modelo UWST a utilizar.

Es altamente recomendable trabajar con un lenguaje de programación para manejar datos masivos por la facilidad que brinda al manejar grandes cantidades de información espacial en formato tiff.

Específicamente se analizó dos de los tres subproductos internos dentro del producto SMAP-L4:

- Geophysical Data (SPL4SMGP)
- Analysis Update Data (SPL4SMAU)
- Land Model Constants (SPL4SMLM)

Dos de estos sub productos poseen información en intervalos de 3 horas (geophysical file and analysis update) mientras que el tercero (Land Model Constants) alberga información fija sobre constantes que justifican la representación geofísica de la superficie del suelo analizados (Reichle, R., et al, 2021)

Se realizó una cuidadosa inspección de los tres subproductos para extraer los datos de humedad a utilizar, verificando el contenido total del producto SMAP-L4.

A través de “*smapr package*” fue posible descargar información en distintos periodos y realizar un análisis de variación de la humedad a lo largo del mes de análisis. *smapr* necesita una cuenta de usuario para acceder a la información requerida, cada archivo descargado se encuentra en formato HDF5 con múltiples conjuntos de datos, cada archivo corresponde a diferentes escalas de tiempo (cada 3 horas) los cuales son indicados por el nombre del archivo. Además, se puede visualizar información extra como valores máximos o mínimos, extensión, proyección, numero de datos, etc. También permite identificar la zona de estudio.

SMAP-L4 al generar información diaria tuvo que ser procesada para su análisis a nivel mensual a través del

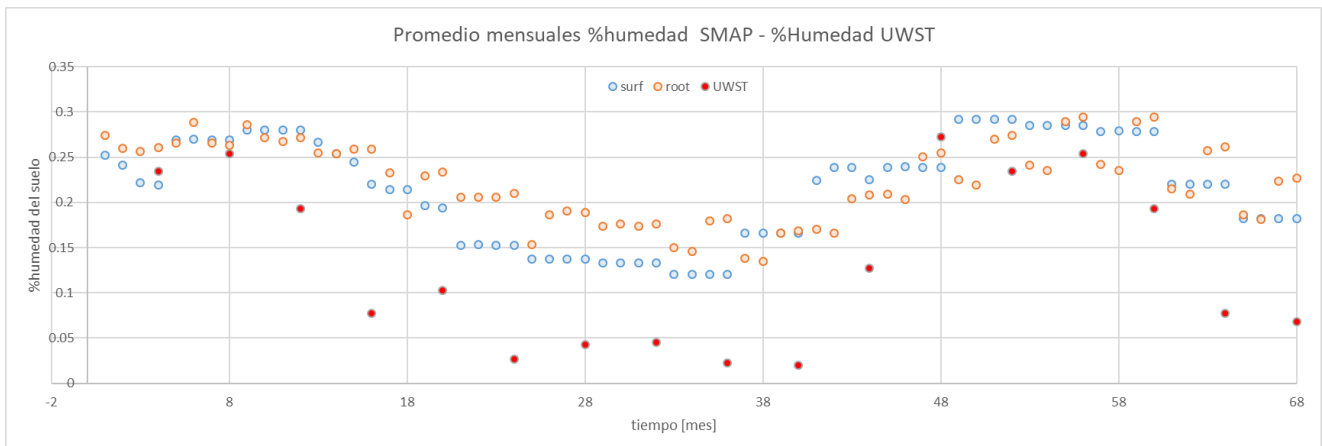


Fig. 4 Humedad de suelo a nivel mensual desde ene-2021 a may-2022 del producto *SMAP-L4* frente a la humedad de suelo calibrada del modelo UWST. Elaboración propia

análisis en intervalos de 10 días. Esta consideración permite visualizar el estado de carga y descarga del agua en el suelo por pixel de análisis (Fig. 4) Analizando los promedios mensuales es posible evidenciar que más de un factor a lo largo de la cuenca influye en el proceso de análisis del contenido de agua en el suelo.

3.5 Valoración de resultados

Como se puede apreciar en la Figura 3 las salidas gráficas en los hidrogramas generados se puede concluir un buen desempeño del modelo al simular de manera muy aproximada la dinámica del comportamiento de los caudales en periodos húmedos (valores pico)

El modelo HydroBID presentó ciertos problemas de simulación en los caudales pico de los años 2005 y 2002 resultaron ser subestimados, mientras que los caudales

de los años 2001, 2012 y 2014 sobreestimados. Puede haber muchos factores que incidan en las salidas de resultados, no se aplicó modificadores de precipitación.

Los caudales generados al año 2022 serán utilizados para el análisis de balance a futuro con los parámetros de calibración bien establecidos y fundamentados con información de campo.

La figura 5 muestra las salidas gráficas del producto SMAP-L4 resaltando el tamaño de pixel que maneja y la interpretación de sus resultados. Esta grafica fue implementada como una referencia de los valores obtenidos por pixel para cada microcuenca (COMID)

Las figuras 6 y 7 ilustran el comportamiento del contenido de agua en el suelo en proporciones volumétricas (m^3/m^3) de las salidas del producto SMAP-

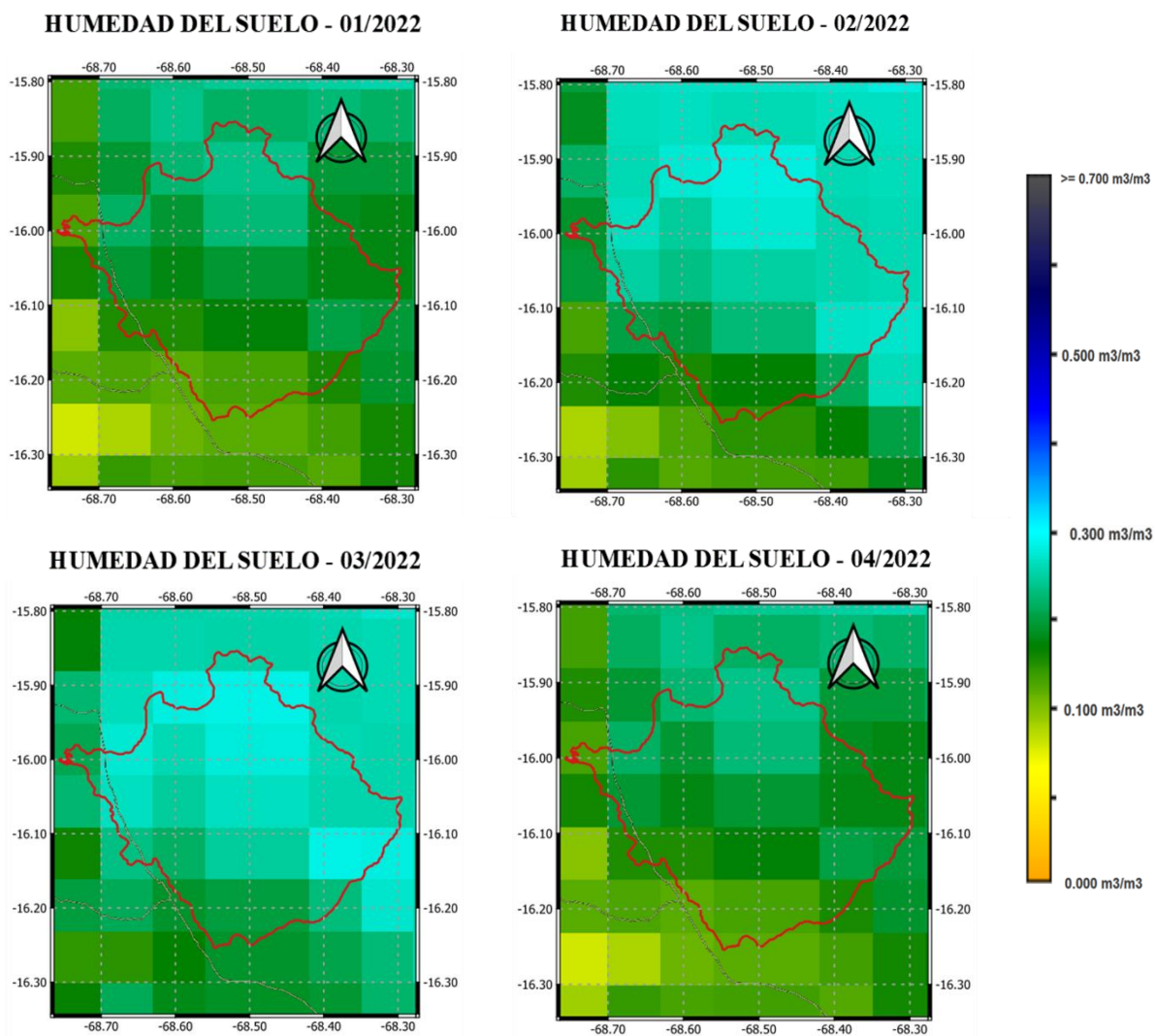


Fig.5 Mapa de contenido de agua en unidades volumétricas (enero-2022 a marzo-2022) Imagen de humedad de suelo (SMAP) Información extraída de la página <https://worldview.earthdata.nasa.gov>

L4 con respecto a la información de salida del modelo UWST. Se puede evidenciar la clara falta de información del terreno que permita simular un mejor comportamiento. Cabe destacar la buena aproximación de resultados en los meses húmedos y no así en el periodo de estiaje. Los parámetros de calibración corresponden a una representación física matemática del escurrimiento del suelo sumado a un factor de pendiente, aun no se tiene una idea clara del porqué de la muy notable variación en el contenido de humedad del modelo UWST y el producto SMAP-L4. Por lo cual no se los resumirá en el presente artículo a fin de evitar una falsa interpretación de las salidas finales y aclarando

que el presente proyecto piloto aún se encuentra en ejecución.

Finalmente, la figura 8 muestra la salida final del modelo UWST expresando el volumen de agua por metro cuadrado de superficie en cada microcuencia (l/m^2). Esta fu ajustada en función de un valor de riego teórico permisible para sostener el cultivo a lo largo del año. Si bien no se cuenta con información de campo para criticar y valorar de manera precisa esta salida de resultados, se evidencia que el modelo predictivo UWST logró representar de manera aproximada el

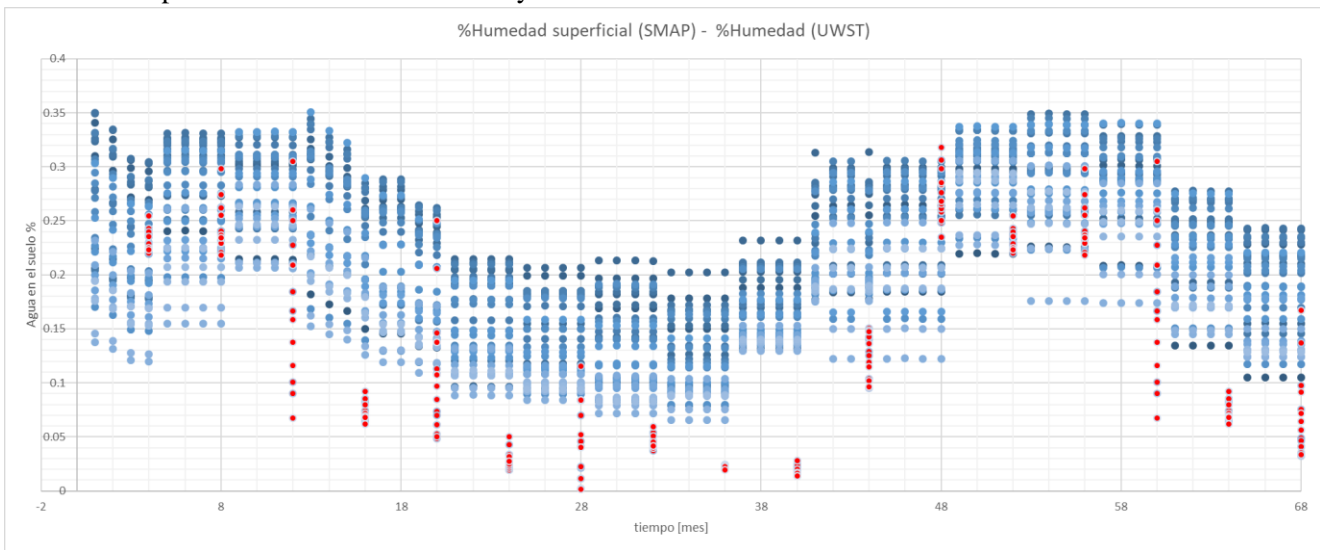


Fig. 6 Humedad de suelo desde ene-2021 a may-2022 del producto *SMAP-L4* frente a la humedad de suelo calibrada del modelo UWST. Elaboración propia

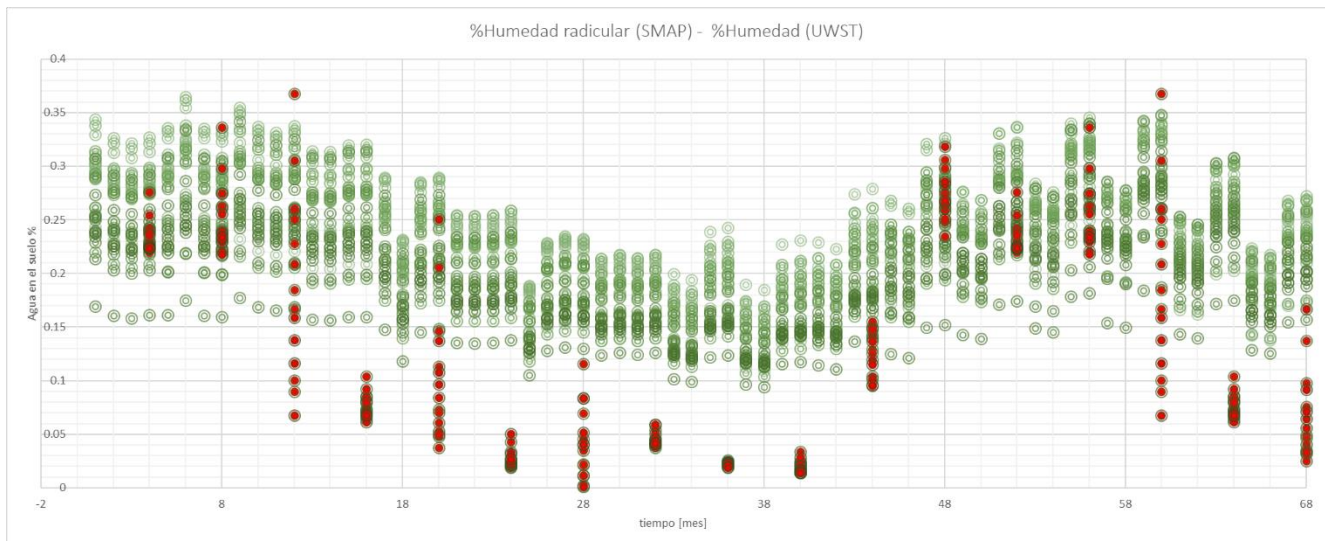


Fig. 7 Humedad de suelo desde ene-2021 a may-2022 del producto *SMAP-L4* frente a la humedad de suelo calibrada del modelo UWST. Elaboración propia

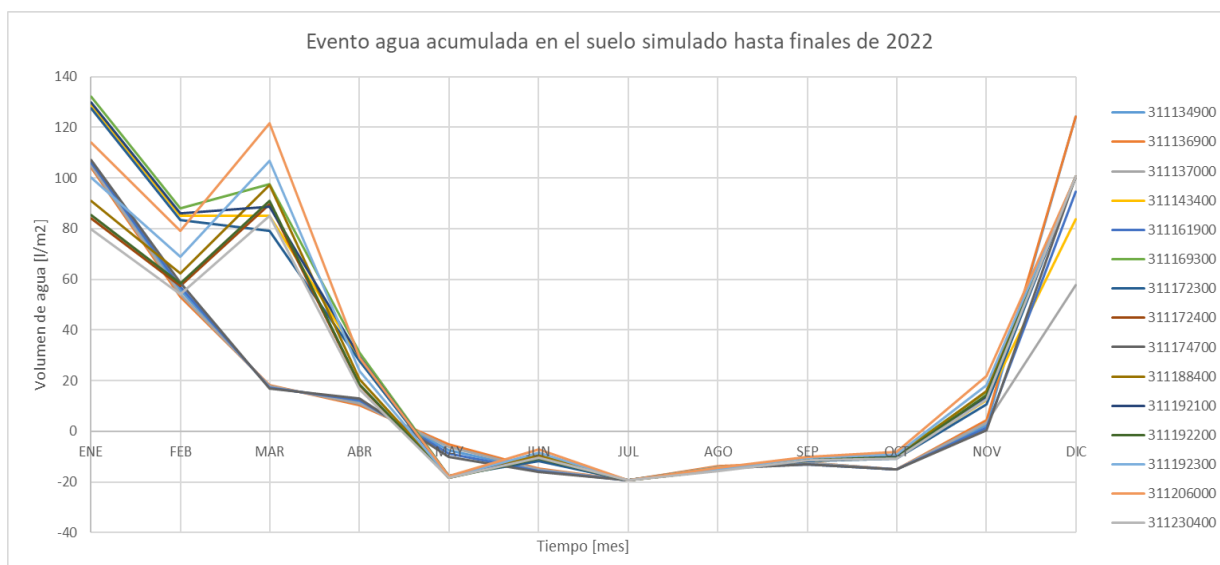


Fig. 8 Escenario de contenido de agua en el suelo hasta diciembre de 2022. Primera simulación generada por el modelo periodo enero de 2022 a diciembre de 2022. Elaboración propia

comportamiento del estado de humedad en procesos de carga y descarga del suelo a lo largo del año.

4 Conclusiones

- Es necesario acudir a herramientas e información más precisa para abordar un estudio similar en cuencas con menor información hidrometeorológica.
- Se ha mostrado la factibilidad de contar con información de humedad del suelo obtenidas mediante sensores remotos satelitales de manera sistemática, considerando así que es posible elaborar mapas de humedad de suelo semanal y mensual.
- Es posible generar nuevos índices que relacionen las zonas con alta capacidad de almacenaje de agua en una cuenca de estudio.
- A falta de información de campo que permita validar los más precisa sobre los métodos de riego, y sus periodos de funcionamiento.
- Al considerar un estudio preliminar en la cuenca piloto se concluye una gratificante línea de investigación planteada por la unidad.

5 Referencias

Entekhabi, D., y coautores, 2014; SMAP Handbook, Soil Moisture Active Passive. Disponible en: <http://smap.jpl.nasa.gov/mission/description/>

Malik, M., S., and J.P. Shukla, 2014: Estimation of soil moisture by remote sensing and field methods: A review, *International Journal of Remote Sensing & Geoscience*, Volume 3, Issue 4, July, pp21-27.

Moreda, F. 2014. Hydro-BID: un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Parte 2 / Fekadu Moreda, Fernando Millares-Wilhelm, Raúl Muñoz Castillo. Nota Técnica del BID, 73 pp.

Reichle, R., G. De Lannoy, R. D. Koster, W. T. Crow, J. S. Kimball, and Q. Liu. 2021. *SMAP L4 Global 3-hourly 9 km EASE-Grid Surface and Root Zone Soil Moisture Analysis Update, Version 6*. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M. S., y Mattia, F., 2008: On the soil roughness parametrization problem in a soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar. *Remote Sens.*, 8, 4213-4248