

ESTIMACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO MEDIANTE EL BALANCE HIDROLÓGICO OPERATIVO AGRÍCOLA, PARA LOS DEPARTAMENTOS SANTA CATALINA Y COCHINOCA, PROVINCIA DE JUJUY

WATER ESTIMATION IN SOIL FOR SANTA CATALINA AND COCHINOCA DEPARTMENTS IN JUJUY PROVINCE

Toconás, P. J. A.¹; Alabar, F. D.²; Arias, M. P.³; Hurtado, R. H.²

RESUMEN

En el informe climático de la Puna sobre la situación de la sequía, solicitada por el gobierno de la provincia para la declaración de la emergencia agropecuaria de la región, y realizado por la cátedra de Agroclimatología de la Universidad Nacional de Jujuy en el año 2016, se observa que las deficiencias de agua en el suelo presentan una tendencia negativa creciente. Un modo de estimar esta deficiencia es mediante el Balance Hidrológico Operativo Agropecuario (BHOA). En la Argentina, el INTA aplica esta herramienta utilizando datos de precipitación ofrecida por sensores remotos, pero sin considerar la región de Puna. El objetivo del trabajo es aplicar el BHOA para determinar la dinámica espacio-temporal de la disponibilidad hídrica del suelo en los departamentos Santa Catalina y Rinconada en la Puna jujeña. Para la aplicación de este modelo se utilizaron: la precipitación diaria estimada mediante la técnica IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM), con posterior interpolación (kriging) de los datos, empleando los modelos exponencial, gaussiano y esférico; las constantes hídricas del suelo determinadas en laboratorio y con el software SPAW, y la evapotranspiración ajustada diaria estimada mediante una función lineal de tercer orden. Los resultados obtenidos muestran un ajuste significativo, aunque sobreestimados por SPAW respecto, a los valores de constantes hídricas determinados en laboratorio. En el BHOA, el modelo exponencial es el que menor error presenta (error cuadrático medio, RMSE y error absoluto medio, MAE), siendo el adecuado para la interpolación de los datos de precipitación en los sitios de estudio.

Palabras clave: Balance hidrológico. Constantes hídricas. Disponibilidad hídrica en el suelo. Puna. Balance hidrológico operativo agropecuario.

SUMMARY

In the Puna climate report about the drought situation requested by the provincial government in order to declare the agricultural emergency in the region, which was carried out by the chair of Agroclimatology of the National University of Jujuy in 2016, deficiencies of water in the soil showing a growing negative trend are noticed. One way to estimate this deficiency is through the Agricultural Operational Hydrological Balance (BHOA). In Argentina, INTA applies this tool using precipitation data offered by remote sensors, but

1-Becario BEyRA. FCA-UNJu. Alberdi 47 (4600). San Salvador de Jujuy. Argentina. e-mail: paultoconas95@gmail.com

2-Cátedra de Agroclimatología; 3- Cátedra de Edafología. FCA-UNJu. Alberdi 47 (4600). San Salvador de Jujuy. Argentina.

without taking into account the Puna region. The objective of this study is to apply the BHOA to determine the spatio-temporal dynamics of soil water availability in Santa Catalina and Rinconada departments in the Puna Jujeña. To apply this model the daily precipitation estimated using the IMERG technique (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM), with subsequent interpolation (kriging) of the data, using the exponential, gaussian and spherical models; the water constants of the soil determined in the laboratory and with the SPAW software, together with the adjusted daily evapotranspiration estimated by a linear third-order function were used. The results obtained show a significant adjustment, although overestimated by SPAW regarding the values of water constants determined in the laboratory. In the BHOA, the exponential model is the one with the least error (mean square error, RMSE and mean absolute error, MAE), being suitable for the interpolation of precipitation data in the study sites.

Keywords: BOA-hydrological operational balance of agriculture. Hydrological balance. Water constants. Puna. Water availability in the soil.

INTRODUCCIÓN

La variación en la cantidad de agua del suelo es un proceso natural que forma parte del dinamismo de los sistemas climáticos y meteorológicos de la tierra. Supone una cantidad de agua disponible, como así también una restricción de agua, pudiendo ocasionar adversidades en actividades que dependen de ella, tales como la agricultura y la ganadería, si no existe capacidad de gestión de los recursos hídricos (FAO, 2015). Las condiciones de aridez de la región de la Puna son un rasgo permanente, por lo que la deficiencia de agua del suelo suele ser negativa, es decir, es una característica climática normal (Hurtado y otros, 2016). Sin embargo, se dan períodos en los cuales, las precipitaciones se apartan significativamente de la normalidad. Esta característica es utilizada como una herramienta de predicción de sequía. En el "Informe Climático sobre la Sequía (2015- 2016) ocurrida en la Puna Jujeña" (Hurtado y otros, 2016), realizado por la cátedra de Agroclimatología de la Universidad Nacional de Jujuy frente a la solicitud del gobierno de la provincia de Jujuy para la declaración de la emergencia agropecuaria de la región, se menciona que las anomalías de las deficiencias de agua en el suelo presentan una tendencia negativa que va en aumento. En este contexto, contar con información de la disponibilidad hídrica en el suelo es crucial. Una manera de estimarla es mediante el Balance Hidrológico Operativo Agropecuario (BHOA) (Fernández Long y otros, 2012). Este balance utiliza valores diarios de precipitación, evapotranspiración (ET) y parámetros relacionados con las características físicas del suelo, como la

capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). En la provincia de Jujuy, la escasez y distribución heterogénea de estaciones meteorológicas dificulta la estimación de ET y precipitaciones, quedando regiones sin información.

Una alternativa para adquirir información espacio-temporal de la precipitación, es estimarla empleando sensores remotos de microondas pasivas (Joyce y otros, 2004) incorporados en varios satélites espaciales (Kidd y otros, 2003). La última misión espacial que emplea esta tecnología es Global Precipitation Measurement (GPM), misión iniciada por la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) quienes, junto a un consorcio de socios internacionales, constituyen la constelación de sensores de GPM a fin de unificar las mediciones espaciales de precipitación global (Kidd, 2003). El observatorio central de la misión (GPM Core Observatory, GPM-CO), lanzado en 2014, transporta sensores de precipitación de última tecnología, tales como el Dual- frequency Precipitation Radar (DPR), el cual es un radar de doble frecuencia (14 GHz para tasas de lluvias relativamente fuertes y 35 GHz para tasas de lluvias y nieve ligeras) y el Global Precipitation Measurement Microwave Imager (GMI), siendo este un radiómetro de microondas pasivo multifrecuencia (10-187 GHz) que mejora el grado de detalle de cada medición (Skofronick-Jackson y otros, 2017). Las mediciones realizadas por el GPM-CO brindan información detallada sobre la variabilidad de la precipitación en un área específica (Skofronick-Jackson y otros, 2017 citados por Méndez Rivas, 2016). Tanto GMI como

DPR son un estándar para calibrar los algoritmos de recuperación de precipitación, estableciendo una referencia para comparar datos aportados por los demás satélites de la constelación (Draper y otros, 2015). En comparación con misiones anteriores, la cobertura del GPM- CO (68°N/S) aumenta la precisión de la medición de precipitación para las latitudes medias y altas; además, proporciona observaciones frecuentes de precipitación, de las cuales, el 80% está a menos de 3 h de separación, excediendo el mínimo que se considera necesario para aplicaciones hidrometeorológicas (Nijssen y Lettenmaier, 2004). Las capacidades de GPM aportan datos que ayudarán a entender cómo los cambios en los patrones de precipitación a múltiples escalas se traducen en cambios en el ciclo hídrico (evapotranspiración, humedad del suelo, recarga de aguas subterráneas). El Programa de las Naciones Unidas sobre "Teleobservación para la gestión sustantiva del agua en zonas áridas y semiáridas" ha identificado a GPM como un excelente ejemplo de uso del espacio con fines pacíficos (Hou y otros, 2014). IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) es un algoritmo que combina datos del GMI/ DPR con los satélites del grupo del GPM para generar mejores estimaciones espaciales y temporales de precipitación (Skofronick-Jackson y otros, 2017). Ofrece datos con una resolución espacial de 0,1° y una resolución temporal de 30 minutos, diaria y mensual, en horario UTC. Los datos de precipitación de las misiones GPM están disponibles de forma gratuita para el público, accediendo al enlace web <https://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/gpm>.

La ET se la obtiene por metodologías de base empírica o físico-matemática, tales como: Thornthwaite (TH) (1945, 1948), Hargreaves y Samani (H-S) (1985) y Penman-Monteith (P-M) (1948), entre otros. La ecuación de P-M presenta como limitante la elevada cantidad de parámetros para su estimación; no obstante, es reconocida como un estándar de comparación para datos obtenidos mediante otros métodos. En Jujuy, la escasez de registros meteorológicos dificulta su aplicación. Ante esta situación, Moreno y otros (2014) determinaron una función general para ajustar el cálculo de ET por H-S a P-M, aplicada para todos los meses del año.

Los datos de precipitación obtenidos vía satélite, son presentados en forma de puntos de grillas, los cuales generalmente no coinciden con el sitio específico en estudio. Una de las técnicas para

obtener la información de la precipitación de un punto específico es la interpolación, de la cual el método Kriging resulta ser uno de los más certeros. El kriging es una técnica de interpolación que analiza, mediante cálculos geoestadísticos, el comportamiento de la variable en el espacio. La herramienta básica es el análisis de semivarianza y el producto fundamental de este análisis es el semivariograma (Gallardo, 2006). Para interpretar el semivariograma se parte del siguiente criterio: a menor distancia entre los sitios, mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones (Henao, 2009). El semivariograma requiere ajustar una función para cuantificar el grado y la escala de la variación espacial. Las funciones que ofrece para su ejecución, son la esférica, la exponencial, la gaussiana, entre otras. El resultado final del kriging es un mapa con los valores interpolados de la variable, y otro con el grado de incertidumbre de cada interpolación. Zucarelli y otros (2014), consideran a mencionada metodología como la adecuada para el cálculo de precipitación mensual en Argentina. En España, Botey y Moreno García (2015) aplicaron este método para estimar el contenido hídrico del suelo mediante el balance hídrico exponencial diario.

Los parámetros relacionados con la retención de agua en el suelo se obtienen por medición in situ, en laboratorio o su estimación a partir de sus propiedades físicas. Las mediciones in situ resultan costosas en tiempo y recursos y se complementa con procedimientos desarrollados en laboratorio. Para ello, se han desarrollado funciones que relacionan las variables del suelo con el contenido de agua volumétrico a potenciales hídricos seleccionados, las cuales se denominan ecuaciones de pedotransferencia (EPT) (Damiano y Taboada, 2000), sin embargo, la determinación en laboratorio de las constantes hídricas resulta más precisa, la cual sirve como testigo para las ecuaciones de ETP. Como una alternativa válida para estimar la retención de humedad del suelo, Pineda y Vilorio (1997) en Venezuela, desarrollaron EPTs que estiman la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) a partir de regresiones lineales. Saxton (2009), basándose en relaciones estadísticas entre la textura y el potencial hídrico del suelo, obtuvo una EPT que incluye más variables para su obtención. El sistema predictivo fue programado en un modelo gráfico computarizado denominado SPAW (Suelo-planta-atmósfera-agua, Versión 6.02). Alabar y otros (2014) en base a la información disponible

de los suelos del NOA (Osinaga y otros, 2009), determinaron las constantes hidrológicas para más de 300 asociaciones de suelos de las provincias de Jujuy y Salta, aplicando el software SPAW. A nivel local, Sandoval y otros (2016) obtuvieron una EPT para lotes con diferente historia de manejo en el Dpto. El Carmen, (Jujuy).

Para la determinación del agua en el suelo, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) aplican el modelo BHOA (Balance Hidrológico Operativo con Fines Agrícolas), basado en la metodología de Thornthwaite-Mather y desarrollado por Fernández Long y otros (2012). Este balance utiliza constantes hidrológicas representativas de los suelos agrícolas de la Argentina y actualmente se encuentra a prueba con datos de precipitación provenientes de satélites. Sin embargo, como en nuestra región los mapas de salida no muestran información, es posible utilizar este modelo para determinar la variación espacio-temporal del agua en el suelo, determinando las constantes hídricas para la región de la Puna con datos de precipitación provenientes de sensores remotos, utilizando la técnica de interpolación descripta para sitios sin información de esta variable.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en sitios que se corresponden con lotes de productores agrícolas - ganaderos ubicados en los departamentos Santa Catalina y Cochinoca. En Santa Catalina se localizaron cinco sitios (1: 22°4'44.85"S, 66°15'27.28"O; 2: 21°54'20.70"S 66° 3'1.44"O; 3: 21°57'4.75"S 66° 1'29.07"O; 4: 22° 5'51.10"S 66° 7'47.13"O; 5: 22°13' 33.17"S 66°14'46.03"O) y en Cochinoca dos sitios (6: 22°37'6.69"S 65°30'27.57"O; 7: 22°45'59.41"S 65°54'37.18"O).

Constantes Hídricas

Se emplearon las constantes hídricas obtenidas por Toconás (2017) para los sitios en estudio, los cuales fueron determinadas mediante el método del Terrón Húmedo, y a su vez, estimadas con el software SPAW.

Precipitación

Los valores estimados de precipitación diaria se

obtuvieron de los datos procesados mediante el algoritmo I-MERG, empleado por la misión satelital GPM. Se filtraron los datos para el área delimitada por las coordenadas geográficas 21°36'00'S-23°6'00'S y Longitud 66°36'00'O-65°12'00'O. La información filtrada se presenta en forma de puntos de grilla, con una resolución espacial de 0.1° y con una frecuencia temporal diaria (Figura 1).

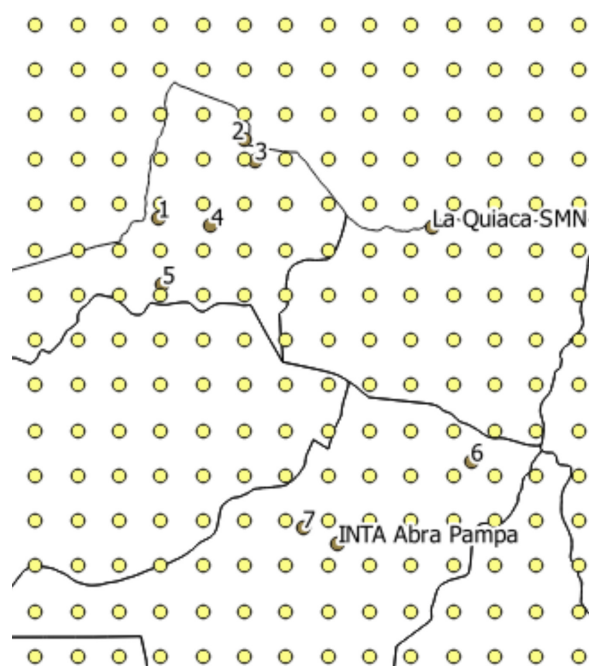


Figura 1. Puntos de grillas de la precipitación diaria estimada por el algoritmo IMERG y filtrada para la zona de estudio. (Fuente: elaboración propia en base a datos de la NASA, 2018).

Al no coincidir los valores de precipitación de los puntos de grilla con los sitios de estudio, se ha elaborado la interpolación de los mismos mediante la técnica kriging.

$$PP_{(La\ Quiaca)} = \lambda_1 * PP_{(punto\ de\ grilla\ 1)} + \dots + \lambda_n * PP_{(punto\ de\ grilla\ n)}$$

Donde:

PP_(La Quiaca): es el valor interpolado de precipitación diaria, utilizando el modelo en cuestión

PP_(punto de grilla n): es el valor de precipitación diario obtenido del IMERG en el punto de grilla n.

λ_i : representan los pesos o ponderaciones correspondientes a cada punto de grilla.

El procedimiento para el cálculo de los valores λ_i , es común para todos los modelos de ajuste del semivariograma. Tanto el valor de meseta como el de rango, se obtienen del semivariograma experimental diario omnidireccional (Figura 2).

$$\gamma_{(h)} = 0.5 N_{(h)} \sum [Punto\ de\ grilla_{(x)} - Punto\ de\ grilla_{(x+h)}]^2$$

Donde:

$\gamma(h)$: es la semivarianza para todos los puntos de grillas localizadas en el espacio separado por el intervalo de distancia h (Figura 2).

$N(h)$: es el número total de pares de puntos de grillas separados por un intervalo de distancia h .

Punto de grilla (x): es el valor de precipitación obtenida por la técnica IMERG en el punto de grilla, en una localización x .

Punto de grilla ($x+h$): valor de precipitación obtenida por la técnica IMERG en el punto de grilla a la distancia de intervalo h desde x .

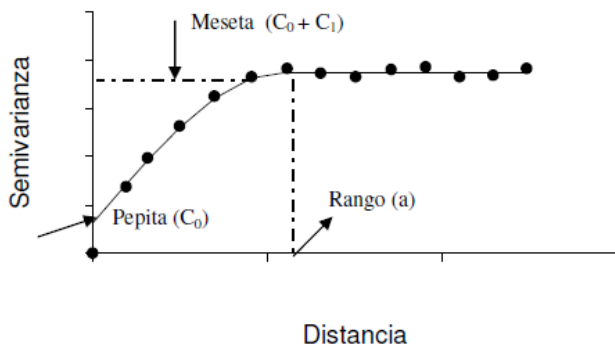


Figura 2. Semivariograma experimental.

lo que se reemplaza únicamente, es el algoritmo de cada modelo, al realizar el ajuste del semivariograma diario (Fig.3).

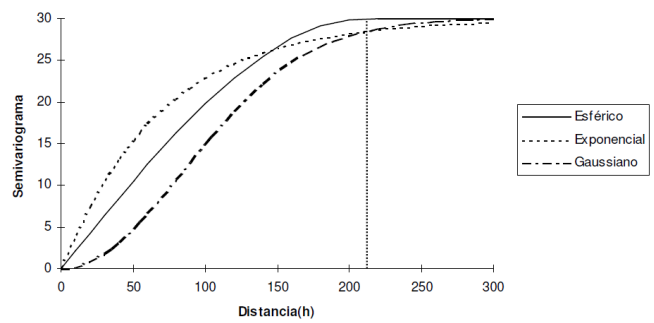


Figura 3. Diferentes modelos para el ajuste del semivariograma.

Para la ejecución de la interpolación, se aplicó el programa Surfer versión 14 (Golden Software, Inc), el cual posee diferentes metodologías de interpolación, y los tres modelos de ajuste del método kriging.

Validación de los modelos de interpolación

Se realizó la bondad de ajuste entre los valores observados y los estimados a través del coeficiente de correlación (R) (Serio y otros, 2007) y los estadísticos sugeridos por Willmot (1982) (figura con una t en la bibliografía corregir): raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y el sesgo (MBE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}; \quad MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |P_i - O_i|}{N}; \quad MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N}$$

Donde:

O_i : valores de precipitaciones medidas en superficie.

$\neg P_i$: valores de precipitaciones interpoladas por el método Kriging, para los diferentes modelos.

N : números totales de datos.

Menores valores de MAE indican un método con pocos errores (Villatoro y otros, 2008); el RMSE evalúa el error global de la precipitación interpolada diaria, y el MBE determina la desviación de los datos estimados con respecto a los datos observados, siendo valores negativos una subestimación y positivos una sobreestimación (Abad Encalada, 2014). Los valores de precipitación diaria medidas

en superficie, necesarios para la validación de las estimaciones, fueron adquiridos de la base de datos de la Estación Meteorológica INTA Abra Pampa.

Evapotranspiración

Dada la inexistencia de datos meteorológicos de los sitios en estudio, se procedió a estimar la ET de las localidades más cercanas a los sitios en las que exista datos climáticos (Tabla 1, Fig. 4).

Departamento	Sitio	Localidad más cercana	Distancia (en km)
Santa Catalina	1	Oratorio	14,4
	2	Santa Catalina	5,75
	3	Santa Catalina	5,13
	4	Oratorio	0,29
	5	Oratorio	20,05
Cochinoca	6	Lulluchayoc	17,84
	7	INTA Abra Pampa	10,23

Tabla 1. Localidades con datos climáticos más cercanas a los sitios de estudio.



Figura 4. Ubicación geográfica de las localidades más cercanas a los sitios de estudio.

El cálculo de la ET fue empleando la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), cuya expresión de estimación es:

$$ET = 0.0023 * RA * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * (T + 17,78)$$

Donde:

ET: evapotranspiración diaria (mm/día)

T: temperatura media diaria del aire (°C)

RA: radiación astronómica diaria, convertida en mm/día

(Tmax-Tmin): diferencia entre temperatura máxima y mínima diaria del aire (°C)

La expresión de la fórmula de la Radiación astronómica diaria es:

$$RA = \frac{24 - 60}{\pi} C_s d_r [\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s]$$

Donde:

- RA: radiación solar en el tope de la atmósfera [MJ m⁻² día⁻¹]

- C_s: constante solar = 0,082 MJ m⁻² min⁻¹

- d_r: distancia relativa inversa Tierra-Sol

- ω_s: ángulo horario a la puesta del Sol [rad]

- φ: latitud [rad]

- δ: declinación solar [rad]

La distancia relativa inversa Tierra-Sol, el ángulo horario a la puesta del sol y la declinación solar se calculan como:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2 \pi}{365} J \right)$$

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2 \pi}{365} J - 1,39 \right)$$

$$\omega_s = \arcsin [-\tan \phi \tan (\delta)]$$

Donde J es el número del día en el año entre el 1 (1 enero) y el 365 o 366 (31 diciembre).

Para ajustar los valores de ET mensual (H-S) a la de (P-M) se aplica el modelo propuesto por Moreno y otros (2014), el cual posee un coeficiente de determinación $R^2 = 0,88$.

$$ET_{aj} = 0,8129 * (ET_{H-S}) + 3,9665$$

Donde:

ET_{aj}: Es el valor de ET H-S ajustado a P-M.

ET H-S: Es el valor de ET por la ecuación de H-S (1985).

Para estimar valores a escala diaria, se transforman los valores mensuales medios de ET_{aj} a valores medio diarios, con una función lineal de tercer orden.

Balance de agua en el suelo

Con los valores interpolados y validados de precipitación diaria, la ET ajustada diaria y las constantes hídricas obtenidas tanto por SPAW como en laboratorio, se estimó para cada una de los sitios en estudio la variación diaria del agua del suelo, empleando la metodología del BHOA. La misma, está representada por las variables Almacenajes y Excesos (Alm+Exc) (Murphy y Hurtado, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Constantes Hídricas

Las tablas 2 y 3, muestran los valores de CC y PMP, expresado en mm de lámina de agua, para los departamentos Santa Catalina y Cochinocha (Toconás, 2017). El software SPAW estima la CC y PMP. El método del Terrón Húmedo solo determina valores de CC, siendo su correspondiente valor de PMP estimado mediante la ecuación sugerida por Grassi (1988):

$$PMP_{estimado} = (CC/2) - 1$$

SITIO	Profundidad (cm)	Constantes Hídricas (en mm de Lámina de Agua)			
		Departamento Santa Catalina			
		CC*	PMP**	CC***	PMP***
1	0-20	31,37	13,68	68,6	37,6
	0-40	73,48	32,74	136,4	84,8
2	0-20	28,87	12,43	45,2	23
	0-40	71,24	31,62	84,6	44,6
3	0-20	34,41	15,2	33,4	16,6
	0-40	88,49	40,25	126,6	87,2
4	0-20	25,49	10,74	31,6	15,6
	0-40	52,46	22,23	67,8	31,8
5	0-20	23,55	9,77	50,8	30,8
	0-40	70,43	31,22	110,2	69

Tabla 2. Constantes hídricas, expresadas en lámina de agua, obtenida por determinaciones y estimaciones (*CC método terrón húmedo; ** PMP según Grassi 1988; * CC y PMP según SPAW).**

SITIO	Profundidad (cm)	Constantes Hídricas (en mm de Lámina de Agua)			
		Departamento Cochinocha			
		CC*	PMP**	CC***	PMP***
6	0-20	21,45	8,73	23,8	11,8
	0-40	59,28	25,64	78	47,4
	0-60	82,01	35	106	63,6
7	0-20 (Estimado)	15,63	5,81	17	7,2
	0-40	31,25	11,63	34	14,4

Tabla 3. Constantes hídricas, expresadas en lámina de agua, obtenida por determinaciones y estimaciones. (*CC método terrón húmedo; ** PMP según Grassi 1988; * CC y PMP según SPAW)**

Precipitación

La tabla 4 muestra los valores de precipitación interpolada por los tres modelos (Exponencial, Gaussiano y Esférico) para el sitio en donde está ubicado la Estación INTA Abra Pampa. En ellas se presentan los valores mensuales, ya que su presentación en forma diaria implicaría una tabla con 731 filas para representar el periodo estudiado.

Año	Mes	PP-Kriging Exponencial	PP-Kriging Gaussiano	PP-Kriging Esférico	PP-Superficie
2016	Ene	89	107	88	21
	Feb	96	110	94	52
	Mar	0	2	1	0
	Abr	0	8	4	2
	May	0	0	0	0
	Jun	0	0	0	0
	Jul	0	0	0	2
	Ago	0	1	0	2
	Sep	4	7	4	1
	Oct	18	34	18	1
	Nov	64	132	143	4
	Dic	170	167	171	23
Año	441	568	523	108	
2017	Ene	368	388	380	42
	Feb	174	207	179	16
	Mar	396	398	406	100
	Abr	26	23	27	0
	May	1	1	1	0
	Jun	0	0	0	0
	Jul	7	5	6	0
	Ago	1	1	1	0
	Sep	14	20	14	0
	Oct	6	6	6	0
	Nov	72	56	72	1
	Dic	549	552	551	64
Año	1614	1657	1643	223	

Tabla 4. Valores de precipitación mensual, expresado en milímetros, (mm) interpolada por los tres modelos y los registrados en superficie, para la Estación INTA Abra Pampa.

Los valores en los diferentes modelos se asemejan al régimen tipo en la región; además, se observa un comportamiento irregular de los mismos, existiendo meses en los que se subestiman o sobrestiman a los valores registrados en superficie. En la tabla 5, se presentan un resumen de los estadísticos R, RMSE, MAE y MBE aplicados a los datos de precipitación, con su nivel de significancia estadística.

Estadísticos	Modelos	INTA AP
R	M. Exponencial	0.272***
	M. Gaussiano	0.273***
	M. Esférico	0.266***
RMSE	M. Exponencial	12.968***
	M. Gaussiano	13.228***
	M. Esférico	13.382***
MAE	M. Exponencial	2.717***
	M. Gaussiano	2.963***
	M. Esférico	2.864***
MBE	M. Exponencial	2.360***
	M. Gaussiano	2.593***
	M. Esférico	2.516***

Tabla 5. Valores de R y SE al 99 (*) por ciento, RMSE, MAE y MBE para la Estación INTA Abra Pampa.**

El modelo gaussiano presentó los mayores valores de correlación (R) entre la precipitación en superficie y la estimada con sensores remotos, seguida por el modelo exponencial. Los tres modelos presentaron un nivel de significancia al 99 por ciento. No obstante, el modelo exponencial, al presentar los menores valores de RMSE, MAE y MBE, posee el menor error global en las estimaciones. Aun cuando los tres modelos sobrestiman los valores de precipitación, el exponencial es el que lo hace en menor magnitud (MBE=2.36 mm); por consiguiente, fue elegido como el método para interpolar los valores diarios de precipitaciones en los sitios en estudio. La tabla 6 contiene los valores de precipitación diaria interpoladas mediante el modelo exponencial para los lugares de estudio. Se presentan los valores mensuales para el periodo 2016-2017, ya que en forma diaria implicaría una tabla con 731 filas para representar el periodo estudiado.

Año	Mes	PP-Kriging Exponencial						
		1	2	3	4	5	6	7
2016	Ene	51	61	60	94	72	111	104
	Feb	59	67	70	105	85	98	97
	Mar	61	67	70	92	87	7	1
	Abr	61	65	67	91	87	1	1
	May	61	67	70	90	87	1	0
	Jun	61	67	70	88	87	0	0
	Jul	61	66	67	87	87	0	0
	Ago	54	89	99	108	78	3	0
	Sep	53	96	103	113	63	10	3
	Oct	55	96	103	110	63	7	18
	Nov	55	97	105	110	63	123	41
	Dic	53	97	105	92	59	390	160
Año	51	73	88	85	59	751	425	
2017	Ene	48	70	80	82	49	418	300
	Feb	58	69	80	84	49	239	243
	Mar	58	68	78	84	49	7	1
	Abr	58	68	78	84	49	1	1
	May	58	59	73	84	42	1	0
	Jun	58	59	73	85	42	0	0
	Jul	58	59	73	87	42	0	0
	Ago	58	60	75	94	42	3	0
	Sep	58	60	75	95	43	10	3
	Oct	61	67	83	95	46	7	18
	Nov	61	68	83	95	46	123	41
	Dic	70	79	94	119	58	486	463
Año	100	120	118	119	125	1295	1070	

Tabla 6. Valores interpolados de precipitación mensual (método exponencial) de los sitios en estudio

Evapotranspiración

De igual manera que la precipitación, en la Tabla 7, se presenta la ET mensual según H-S Ajustada (ETaj) para las localidades más cercanas a los sitios en estudio.

Mes	ET H-S Aj (mm)			
	Abra Pampa INTA (Sitio 7)	Lulluchayoc (Sitio 6)	Santa Catalina (Sitios 2-3)	Oratorio (Sitios 1-4-5)
Ene	5,1	4	4,3	2,7
Feb	4,8	4	4,3	4,4
Mar	4,5	3,9	3,7	3,9
Abr	3,9	3,4	3,5	3,6
May	2,8	2,9	3	3,1
Jun	2,5	2,7	3	3
Jul	2,5	2,7	2,9	2,9
Ago	3,2	3,1	3,4	3,4
Sep	4,6	3,9	4,1	4,2
Oct	5,4	4,4	4,5	4,7
Nov	5,7	4,5	4,4	4,7
Dic	5,4	4,1	4,4	4,3

Tabla 7. Valores mensuales ET mensual según H-S Ajustada (ETaj) para los lugares más cercanos a los sitios en estudio.

Estimación de agua en el suelo

Las figuras 5 a 11, muestran la estimación diaria de agua en el suelo, utilizando la metodología del BHOA para los sitios 1 al 5 en el departamento Santa Catalina, y para los sitios 6 y 7 del departamento Cochínoca, a las profundidades consideradas en la Tabla 3. El balance constituye una relación de lo que ingresa por precipitación y lo que sale por demanda atmosférica (ET) figuras 6 al 12, muestran la estimación diaria de agua en el suelo, utilizando la metodología del BHOA para los sitios del 1 al 5, departamento Santa Catalina, y para los sitios 6 y 7, departamento Cochínoca. El

balance constituye una relación de lo que ingresa por precipitación y lo que sale por demanda atmosférica (ET),

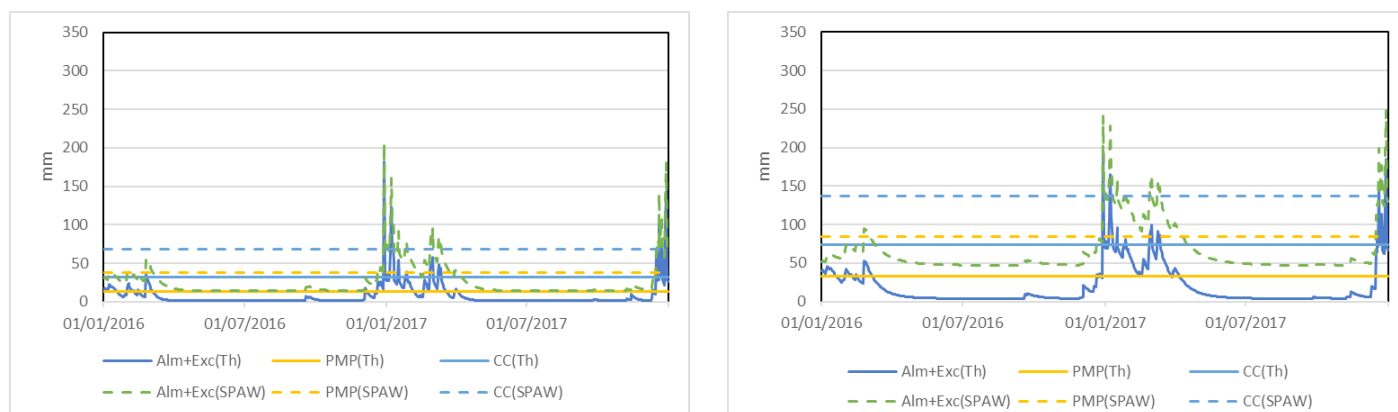


Figura 5. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 1. Departamento Santa Catalina

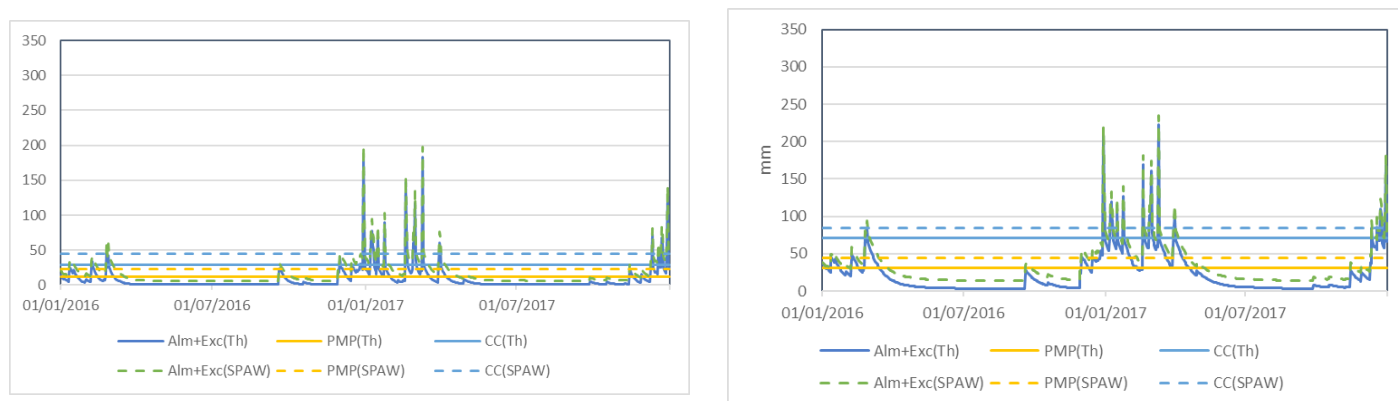


Figura 6. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 2. Departamento Santa Catalina

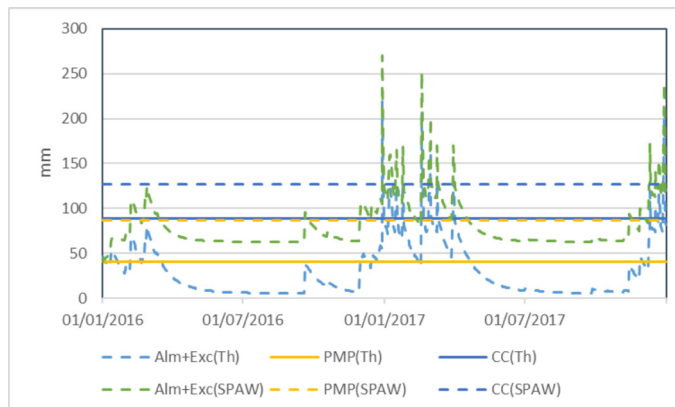
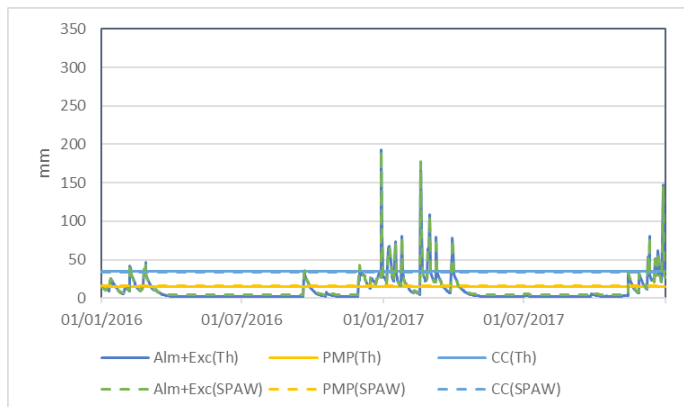


Figura 7. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 3. Departamento Santa Catalina

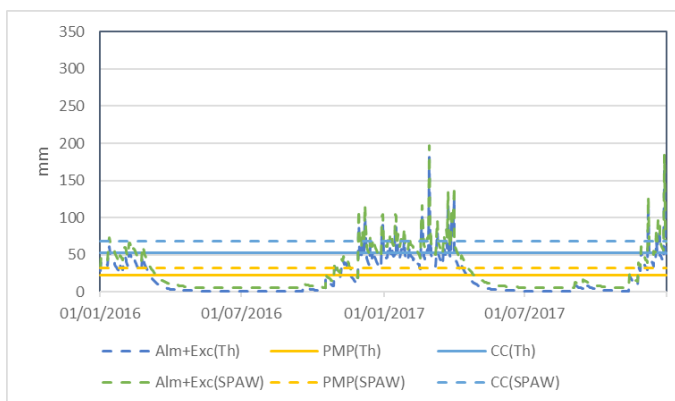
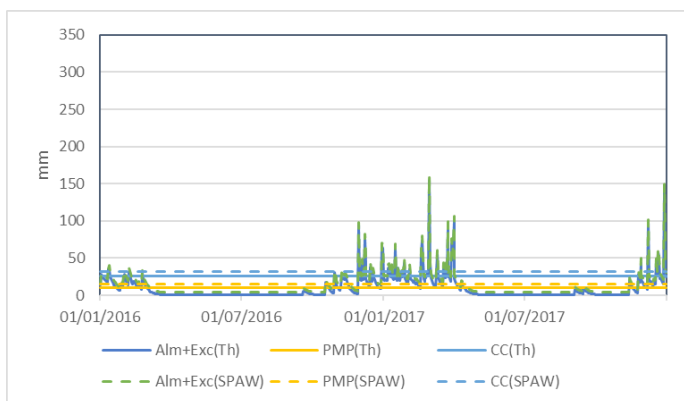


Figura 8. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 4. Departamento Santa Catalina

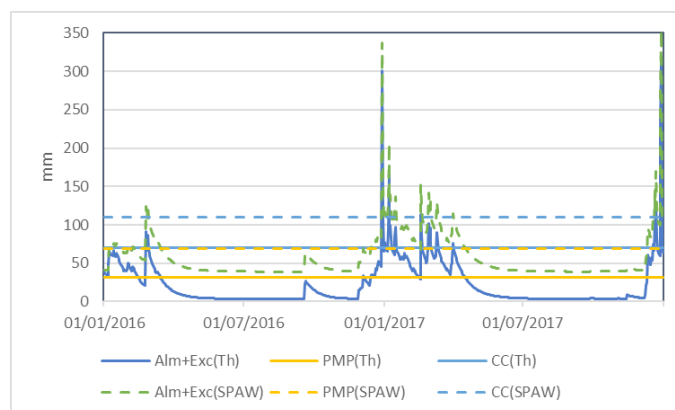
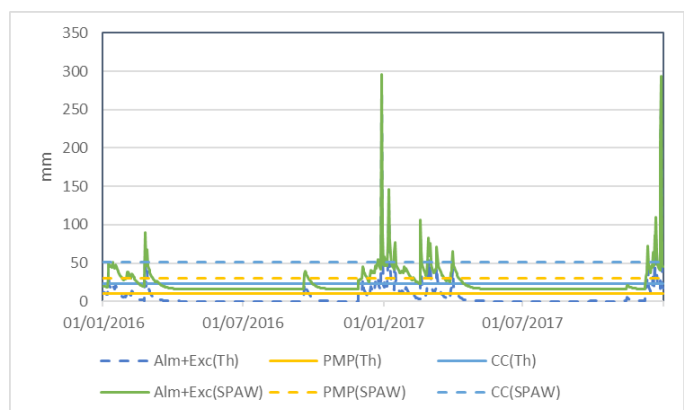


Figura 9. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 5. Departamento Santa Catalina

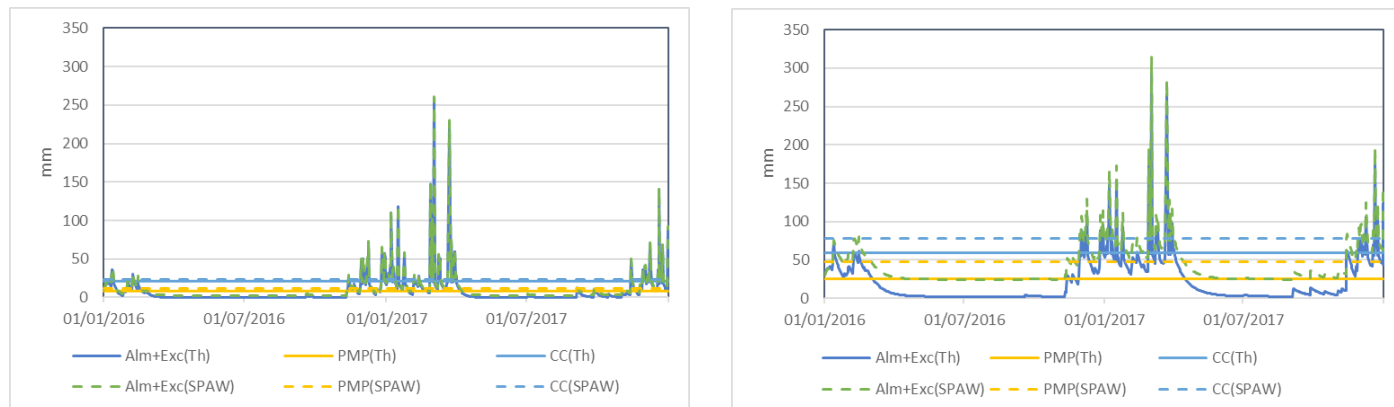


Figura 10. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 6. Departamento Cochinoca

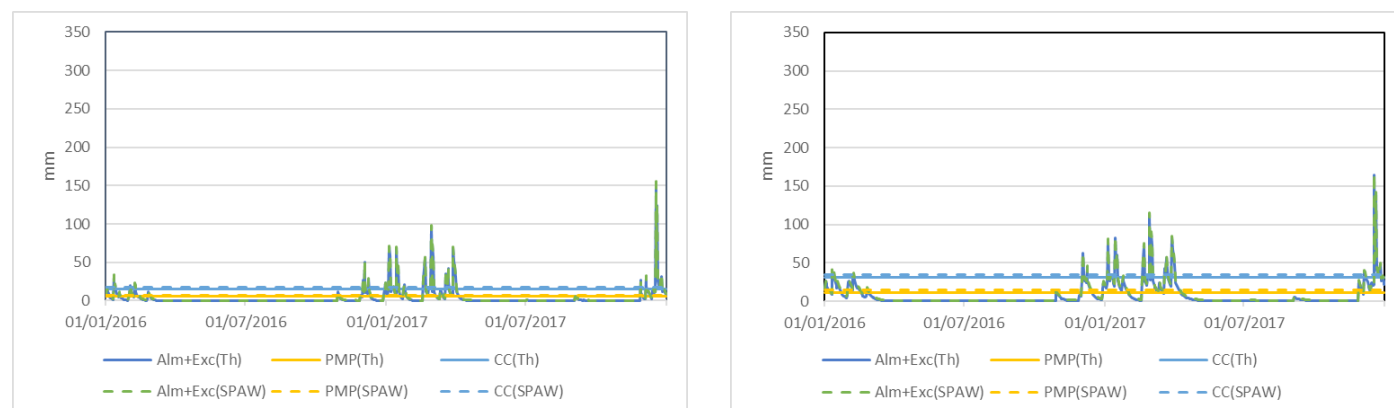


Figura 11. Estimación del agua del suelo, para la profundidad entre 0-20cm (izquierda) y 0-40cm (derecha), en el sitio 7. Departamento Cochinoca.

El agua en el suelo calculada con datos interpolados y ajustados para los sitios de estudio, sigue el mismo patrón de variación que la estimada con valores medidos en superficie. La capacidad de campo estimada por SPAW, tiende a ser mayor. Esto se debe a que los valores de las constantes hídricas estimadas con SPAW son superior a los valores obtenidos en laboratorio en aproximadamente un 40 por ciento.

En la tabla 8, se presentan los valores de R, considerando la relación entre la estimación de agua en el suelo calculada con las constantes hídricas de ambos métodos.

Tabla 8. Valores de R y SE al 99 (*) por ciento, para la estimación de agua en el suelo a partir de los valores de constantes hídricas calculadas mediante Terrón Húmedo y SPAW, para los sitios en estudio.**

Sitio	Prof (cm)	R
1	0-20	0.963***
	0-40	0.968***
2	0-20	0.988***
	0-40	0.998***
3	0-20	0.998***
	0-40	0.956***
4	0-20	0.998***
	0-40	0.998***
5	0-20	0.998***
	0-40	0.998***
6	0-20	0.999***
	0-40	0.995***
7	0-60	0.991***
	0-20	0.999***
	0-40	0.999***

En todos los sitios, y para cada profundidad, la significancia es del 99 por ciento, lo que valida la estimación del contenido de agua del suelo empleando las constantes hídricas calculadas con el software SPAW.

CONCLUSIONES

Una alternativa para aquellas regiones que no posean datos de precipitación registradas en superficie, es la utilización de valores de precipitación estimadas por sensores remotos; resultando ser una aproximación adecuada para la estimación del agua en el suelo.

De los modelos de interpolación de la técnica Kriging, el exponencial constituyó en este trabajo una alternativa adecuada para estimar los valores de la precipitación en superficie, dado su menor error en los estadísticos RMSE y MAE.

El ajuste de la Evapotranspiración (Hargreaves-Samani) en los sitios de estudio es una herramienta útil cuando se carece de datos para efectuar el cálculo de la misma por Penman-Monteith (FAO 56).

La estimación del agua del suelo por el modelo BHOA, sigue adecuadamente el régimen de agua edáfica típico de la región, tornándose una herramienta de planificación agropecuaria.

Los resultados obtenidos son parciales y se debería efectuar el mismo análisis con mayor número de muestras de los sitios estudiados, a fin de obtener valores con mayor precisión agropecuaria.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Agr. Fabio David Alabar, a la Ing. Agr. Mg. Sc. Mónica Patricia Arias y al Ing. Agr. Mg. Sc. Rafael Horacio Hurtado. Agradezco la paciencia, tiempo y dedicación que tuvieron para que esto saliera de manera exitosa. Son parte de la columna vertebral de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Abad Encalada, I. O. 2014. Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica. Disponible en: <http://dspace>.

ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19857/1/Tesis.pdf. Último acceso: 27 diciembre 2018

Alabar, F.; Hurtado, R.; Arias, P.; Valdiviezo Corte, M.; Moreno, C.; Mayo, H.; Portal, & M.; Riquelme A. 2014. Determinación de las constantes hídricas de los suelos de los valles templados y cálidos de Jujuy. Acta de la Reunión Binacional Uruguay - Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología. 103-104. ISBN 978-987-688-082-4.

Botey, R. & Moreno García, J. M. 2015. Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario. Disponible en: www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/balance_hidrico/Metodologia.pdf. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Damiano F. & Taboada, M.A. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos Agrícolas de la Región Pampeana. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Vol. 18, 2: 77-88.

Draper, D. W.; Newell, D. A.; Wentz, F. J.; Krimchansky, S. & Skofronick-Jackson, G. M. 2015. The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument Overview and Early On-Orbit Performance. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. Vol. 8, 7:3452-3462. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7052302&isnumber=7192754>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

FAO. 2015. Los suelos en el ciclo del agua. Disponible en: <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/326296/>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Fernández Long, M.E.; Spescha, L.; Barnatán, I. & Murphy, G. 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). Disponible en: <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/agronomiayambiente/2012fernandezlong.pdf>. ISSN: 2344-9039. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Gallardo, A. 2006. Geoestadística aplicada. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. 15 (3): 48-58. Disponible en: <https://www>.

revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/161. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Grassi, C.J. 1988. Fundamentos del riego. Serie riego y Drenaje. RD – 38. CIDIAT. Mérida.

Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Eng. in Agric., 1(2): 96-99.

Henao, R.G. 2009. Introducción a la Geoestadística. Disponible en: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/projects/Cursos_Talleres/Curso_R/DOCUMENTOS/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA.pdf. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Hou, A.Y.; Kakar, R.K.; Neeck S.; Azarbarzin A.A.; Kummerow C.D.; Kojima M.; Oki R.; Nakamura K. & Iguchi T. 2014. The Global Precipitation Measurement Mission. The Global Precipitation Measurement Mission. Bull. Amer. Meteor. Soc. 95:701-722. Disponible en <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Hurtado, R.; Valdiviezo Corte, M.; Moreno, C.; Mayo, H.; Alabar, F.; Portal, M. & Riquelme. 2016. Informe climático sobre la sequía (2015-2016) ocurrida en la Puna Jujeña. FCA-UNJu.

Joyce, R. J.; Janowiak, J.E.; Arkin, P.A. & Xie, P. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. Journal Hydrometeorology 5: 487-503.

Kidd, C.K.; Kniveton, M.C.; Todd, M.C. & Bellerby, T.J. 2003. Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. Journal Hydrometeor 4:1088- 1104.

Méndez Rivas, R.A. 2016. Productos de precipitación satelital de alta resolución espacial y temporal en zonas de topografía compleja. Consultado en: <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/21480/RUTH%20ARACELLY%20M%C3%89ND%20RIVAS%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Moreno, C.A.; Portal, M.R.; Alabar, F. & Mayo, H. 2014. Comparación de métodos de estimación de

la Evapotranspiración para ajustar a la metodología de Penman-Monteith (FAO, 56) en Localidades del Noroeste Argentino. Acta de Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología 71-72. Piriápolis. ISBN 978-987-688-08.

Murphy, G. & Hurtado, R. 2011. Agrometeorología. Eudeba. Buenos Aires.

Nijssen, B. & Lettenmaier D. 2004. Effect of precipitation sampling error on simulated hydrological fluxes and states: Anticipating the Global Precipitation Measurement satellites. Journal Geophysical Research 109 (2). Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003JD003497>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Osinaga, R.; Paoli, H.; Volante, J.; Chafatinos, T.; Nadir, A.; Castrillo, S.; Vale, L.; Morales M.; Elena, H. & Noé, Y. 2009. Adecuación a un Sistema de Información Geográfica del estudio "Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy) Convenio INTA-UNSa. Disponible en: http://anterior.inta.gob.ar/prorenea/info/resultados/suelos/RESULTADOS_ASOCIACIONES_pdf.a sp. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Penman-Monteith, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Royal Society London Proceedings Series A 193:120-146.

Pineda, C. & Viloria, J. 1997. Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de Valencia. Revista de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo y del Instituto de Edafología de la Facultad de Agronomía de la Universidad Central de Venezuela 5 (1-2): 39-45.

Sandoval, L.R.; Arias, M.P. & Hormigo, D.F. 2016. Evaluación de la Capacidad de Retención Hídrica de un Argiustol Vértico. Informe Pasantía con trabajo final. Carrera Ingeniería Agronómica. FCA-UNJu.

Saxton, K. 2009. Soil-Plant-Atmosphere-Water Field & Pond hidrology. USDA Agricultural Research Service. Disponible en: <https://data.nal.usda.gov/dataset/soil-plant-atmosphere-water-field-pond-hydrology/resource/c3069c68-b1a7-4423-94a9-76e6ea137e19>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Serio, L.; Spescha, L. & Murphy, G. 2007. Validación de las precipitaciones decádicas en la región pampeana estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/284030469_VALIDACION_DE_LAS_PRECIPITACIONES_DECADICAS_EN_LA_REGION_PAMPEANA_ESTIMADAS_POR_EL_MODELO_ATMOSFERICO_DEL_ECMWF_VALIDATION_OF_10-. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Skofronick-Jackson, G.; Petersen, W.; Berg, W.; Kidd, C.; Stocker, E.; Kirschbaum, D.; Kakar, R.; Braun, S.; Huffman, G.; Iguchi, T.; Kirstetter P.; Kummerow, C.; Meneghini, R.; Oki, R.; Olson, W.; Takayabu, Y.; Furukawa K. & Wilhelm, T. 2017: The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission for Science and Society. Bulletin American Meteorology Society 98(8): 1679-1695. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-D-15-00306.1>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Toconás, P.J.A. 2017. Determinación de las constantes hídricas del suelo en los departamentos de Santa Catalina y Cochinoca de la Provincia de Jujuy. V jornadas sobre ciencias del suelo del NOA para estudiantes y jóvenes profesionales. ISBN: 978-987-3926-27-3.

Villatoro, M.; Henríquez, C. & Sancho, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, ca, cice y p del suelo. Agronomía Costarricense 32 (1): 95-105. Consultado en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/viewFile/6773/6460>. Último acceso: 27 diciembre 2018.

Willmot, C. J. 1982. Some commentas on the evaluation of model perfomance. Bulletin of the American Meteorological Society 63: 1309-1313.

Zucarelli, A.; Paris, M.; Macor, J. 2014. Utilización de kriging para la elaboración de curvas isohietas de precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe, Argentina. 2° Encuentro de Investigadores en Recursos hídricos. Disponible en: <http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.39.pdf>. Último acceso: 27 diciembre 2018.