

ESTIMACIÓN DEL AGUA EN SUELO MEDIANTE UN MODELO DE BALANCE HIDROLÓGICO DIARIO

WATER ESTIMATION IN SOIL THROUGH A DAILY HYDROLOGICAL BALANCE MODEL

Alabar, F.¹; Hurtado, R.¹; Portal, M.¹; Arias, P.²; León Ruíz, S.³; Mayo, H.¹; Valdiviezo Corte, M.¹; Moreno, C.¹; Riquelme, A.¹

RESUMEN

La disponibilidad de agua en el suelo es una herramienta de planificación agropecuaria; una forma de conocer la reserva de agua, es estimarla a partir del balance hidrológico. El objetivo de este trabajo es implementar un modelo de balance diario para cuantificar la disponibilidad de agua en suelo, en seis localidades de las provincias de Jujuy y Salta. Para el cálculo, se considera la metodología del Balance Operativo hidrológico para el agro; utilizando precipitación satelital e interpolando los datos (Kriging) cuando no coinciden los valores de los puntos de grillas con los de las estaciones en superficie; para ello se recurre a tres modelos: exponencial, gaussiano y esférico, este último es el que menor error presenta y ha resultado más preciso en todas las localidades, alcanzando los mayores valores de coeficiente de correlación. Los otros parámetros de entrada como la evapotranspiración, y las constantes hídricas corresponden a las obtenidas por Moreno y otros (2014) y Alabar y otros (2016), respectivamente. El agua en el suelo calculada con los valores de precipitación interpolada y evapotranspiración ajustada, sigue el mismo patrón de variación interanual que la calculada con datos de superficie, por lo que la metodología de estimación resulta adecuada para la planificación agrícola.

Palabras clave: Agua en el suelo. Información Satelital. Interpolación.

SUMMARY

Water availability in the soil is an agricultural planning tool; a way to know the water reserve, is to estimate it from the hydrological balance. The objective of this study is to implement a daily balance model to quantify water availability in soil, in six localities in the provinces of Jujuy and Salta. For the calculation, the hydrological operational balance methodology for agriculture is considered; using satellite precipitation and interpolating the data (Kriging) when the values of the grid points do not coincide with those of the surface stations. For this, three models are used: exponential, Gaussian and spherical, the latter is the one with the lowest error and has been the most accurate in all localities, reaching the highest values of the coefficient correlation coefficient. The other input parameters such as evapotranspiration, and water constants correspond to those obtained by Moreno et al, (2014) and Alabar et al, (2016), respectively. The water in the soil, calculated with the values

of interpolated precipitation and adjusted evapotranspiration, follows the same interannual variation pattern as calculated with surface data, therefore the estimation methodology is suitable for agricultural planning.

Keywords: Interpolation. Satellite information. Water in the soil.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua en el suelo ha sido motivo de estudio desde los comienzos de la Agrometeorología, de interés de los agricultores y de los tomadores de decisión de la empresa agropecuaria; a una escala más amplia de los gobiernos, para asegurar la alimentación de sus respectivos estados, por ser la misma uno de los principales determinantes del rendimiento de los cultivos (Della Maggiore y otros, 2010; Fernández Long y otros, 2012). Una forma de conocer la reserva de agua en el suelo e implementar mejores prácticas para un uso más eficiente, es estimarla a través del balance hidrológico diario (BHD).

En el cálculo del BHD, la precipitación es la variable de mayor peso. En Jujuy y Salta, existen pocas estaciones que miden este parámetro, y se encuentran distribuidas en forma heterogénea, quedando grandes regiones agrícolas sin datos. Una alternativa para obtener información detallada de la variabilidad temporal y espacial de la lluvia, es a partir de sensores remotos (Joyce y otros, 2004; Gebremichael y otros, 2005; Huffman y otros, 2007). Entre los mayores avances en este campo, se destaca la incorporación de sensores de microondas pasivas en varios satélites, que permiten obtener mejores estimaciones de la precipitación (Kidd y otros, 2003). Una de las estimaciones que hace uso de esta nueva tecnología es la técnica CMORPH (Técnica MORPHing del Centro de Predicción del Clima) (Joyce y otros, 2004). Los datos así obtenidos han sido validados para el sudeste de Sudamérica, observándose que este procedimiento captura adecuadamente los eventos de precipitación, mostrando una buena relación en la intensidad relativa de los mismos.

CMORPH realiza un análisis de precipitación global con una muy elevada resolución espacial y temporal. Esta técnica estima la precipitación que proviene de observaciones de microondas satelitales de baja órbita y cuyas características se transmiten a través de información de propagación espacial obtenidas a partir de datos de IR (radiación infrarroja) mediante satélites geoestacionarios. En la actualidad se han incorporado estimaciones de precipitación derivadas de sensores en microondas pasivas como el DMSP 13, 14 y 15 (SSM / I), NOAA-15, 16, 17 y 18 (AMSU-B); AMSR-E y TMI a bordo de los satélites Aqua de la NASA y TRMM, respectivamente. Las mismas son generadas por algoritmos de Ferraro (1997) para SSM / I, Ferraro y otros (2000) para AMSU - B y Kummerow y otros (2001) para TMI, constituyendo un medio por el cual se pueden combinar las estimaciones de los algoritmos. Este método es extremadamente flexible, porque puede incorporar cualquier estimación de precipitación de satélite de microondas (Joyce y otros, 2004).

El método de CMORPH, al utilizar imágenes de radiación infrarroja de satélites geoestacionarios de microondas pasivas actualizadas cada media hora, continuamente está modificando la forma e intensidad de las precipitaciones mediante interpolaciones lineales ponderadas en el tiempo. Este proceso produce un análisis espacial y temporal de la precipitación derivada de microondas-completos, independientemente del campo de temperatura por infrarrojos. Esta técnica fue validada en varios países del mundo (Joyce y otros, 2004).

El segundo parámetro del BHD, es la evapotranspiración (ET), la misma puede ser medida u obtenida por métodos empíricos, entre ellos se incluye a: Thornthwaite (1945, 1948), Camargo (1971), Hargreaves y Samani (H-S) (1985), y además

con base físico matemático, Penman-Monteith (P-M) (FAO 56). La ecuación de P-M, presenta como limitante el número de parámetros necesarios para su estimación, sin embargo, es reconocida como un estándar para compararla con otras metodologías. En Jujuy y Salta, existe cierta dificultad a la hora de estimar la ET debido a la escasez de registros meteorológicos. Para superar esta situación, Moreno y otros (2014), han determinado una función general, para ajustar el cálculo de ET por H-S a P-M, aplicada para todos los meses del año.

Los últimos parámetros relacionados con la retención de agua en el suelo, son las constantes hídricas, las que se obtienen por medición in situ o a partir de sus propiedades físicas y químicas. Las mediciones in situ requieren de instrumental especializado, o procedimientos desarrollados en laboratorio, por lo que su determinación resulta ser costosa en tiempo y recursos. Por ello, se han desarrollado funciones que relacionan las variables del suelo con el contenido de agua, las cuales se denominan ecuaciones de pedotransferencia (EPT) (Damiano y Taboada, 2000). Pineda y Viloria (1997) en Venezuela, plantearon ecuaciones que estiman la capacidad de campo (CC) y punto de marchitez (PM) a partir de regresiones lineales, la cual se considera una alternativa válida para estimar la retención de humedad del suelo. Damiano y Taboada (2000) en Argentina, realizaron estudios comparativos de EPT, demostrando que las mismas estiman aceptablemente los límites de retención de agua a partir de un mínimo de información disponible en la cartografía de suelo.

Correlaciones estadísticas entre la textura y el potencial hídrico del suelo pueden proporcionar estimaciones lo suficientemente precisas para gestionar el uso del agua. Este estudio fue desarrollado por Saxton (2009), y consiste en EPT similares a las reportadas previamente, pero que incluyen más variables para su obtención; este sistema predictivo fue programado en un modelo gráfico computarizado. Alabar y otros (2014) obtienen las primeras constantes hidrológicas de veinte asociaciones de suelos de los valles templados y cálidos de la provincia de Jujuy, utilizando el programa SPAW (Suelo-planta-atmósfera-agua, Versión 6.02) y la información provista por el Sistema de Información Geográfica del estudio de "Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy) Nadir y Chafatinos, 1990" (Osinaga y Paoli, 2009). Varios métodos

desarrollados en los últimos años han demostrado que las EPT, constituyen un sistema predictivo que integra el amplio conocimiento disponible de las variables físicas del suelo con la retención del agua edáfica.

Entre los modelos de BHD, se encuentran el "Bahicu" (Balance Hídrico de cultivos extensivos), desarrollado por Andriani (2012), que permite conocer diariamente la disponibilidad hídrica del cultivo mediante la capacidad de almacenaje de agua del perfil, la tasa de crecimiento de las raíces, la demanda atmosférica y el coeficiente de cultivo. Severina y otros (2012) consideran que el programa estima de manera precisa el contenido de agua en el suelo, y puede ser utilizado como una herramienta confiable para determinar los momentos de riego.

Botey y otros (2009) en España, determinaron el contenido de agua del suelo mediante el balance hídrico exponencial diario; la metodología incluye el cálculo de la evapotranspiración de referencia de P-M (FAO 56) y el balance de agua, con agotamiento exponencial de la reserva, considerando la precipitación como único aporte de agua al suelo. Los autores concluyen que es posible obtener buenos resultados con el balance hídrico, sólo cuando se utilizan valores apropiados de constantes hídricas. La metodología desarrollada por Botey y otros, (2009), es utilizada por el Área de Climatología y Aplicaciones Operativas (España); considera para su computo información fisiográfica para estimar las constantes hídricas, datos meteorológicos para la evapotranspiración y el método de interpolación "Kriging" para el cálculo de precipitación diaria (Botey y otros, 2015).

El Kriging es una técnica de interpolación que se basa en el análisis de la estructura geoestadística de variación de la variable, más que en una simple interpolación lineal. La función básica que describe la variabilidad espacial de la precipitación, se conoce como semivarianza y a su representación gráfica se la denomina semivariograma (Gallardo, 2006). Para interpretar el semivariograma se parte del criterio de que a menor distancia entre los sitios, mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones (Henao, 2009).

El semivariograma proporciona información del comportamiento espacial de la variable; sin embargo, es necesario ajustar una función para

cuantificar el grado y escala de la variación espacial. Existen numerosos modelos que se utilizan en geoestadística, siendo los más usados: el modelo esférico, el exponencial, el gaussiano y el lineal. El ajuste a una función, permite extraer una serie de parámetros que son los que van a ser usados para la interpolación geoestadística (Kriging) y definen el grado y escala de variación espacial. Estos parámetros son el rango, el nugget (efecto pepita), el sill (o meseta), y la proporción de la varianza explicada por el espacio, la cual se expresa en porcentaje. El rango es la distancia a la que la semivarianza deja de aumentar; indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras y representa el tamaño de grano o mancha que corresponde a la variable. El nugget es la varianza no explicada por el modelo y se calcula analíticamente como la intercepción con el eje Y; también se la conoce como varianza error, puesto que la varianza de dos puntos separados por 0 metros (la intercepción con el eje Y) debería ser cero. Es por ello que esta varianza está normalmente indicando variabilidad a una escala inferior a la muestreada; además, los errores analíticos o de muestreo, también contribuyen a la aparición de la varianza error.

La máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos se conoce como sill y debe coincidir con la varianza de la población. La proporción de la varianza explicada por el espacio proporciona el grado de variación espacial, y por tanto el grado de incertidumbre a la hora de interpolar puntos en el espacio. Un alto cociente indica una variable espacialmente muy predecible (Gallardo, 2006). Mediante esta metodología, Collado (1988) y Zucarelli y otros (2014), han estimado la precipitación mensual en México y en Argentina respectivamente, considerando a dicha metodología adecuada para el cálculo de precipitación.

El BHOA (balance hidrológico operativo para el agro), es un modelo de balance desarrollado por Fernández-Long y otros (2012), basado en la metodología de Thornthwaite-Mather con modificaciones, en el cual se calcula la evapotranspiración potencial por P-M y utilizan constantes hidrológicas representativas de los suelos agrícolas de la Argentina. El mismo proporciona una herramienta de decisión objetiva para los tomadores de decisión del sector agrícola y el político y a su vez constituye una base de datos de agua en el suelo,

para la comunidad científica y educativa.

El objetivo de ese trabajo es implementar un modelo de balance hídrico diario para cuantificar la disponibilidad de agua en suelo, en seis localidades de la provincia de Jujuy y Salta, utilizando ecuaciones de ajuste y técnicas de interpolación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se calculó el BHD para el periodo 2014-2016, mediante la metodología del BHOA, propuesta por Fernández Long y otros, (2012) para seis localidades de las provincias de Jujuy y Salta. Las estaciones con las que se trabajó fueron: Jujuy Aero (Lat., 24,38 S; Lon., 65,08 O; 905 m.s.n.m.; Localidad: Perico), Santo Domingo UNJu (Lat., 24,43 S; Lon., 65,12 O; 975 m.s.n.m.; Localidad: Santo Domingo), Jujuy UNJu (Lat., 24,02 S; Lon., 65,18 O; 1302 m.s.n.m.; Localidad: San Salvador de Jujuy) y La Quiaca (Lat., 22,10 S; Lon., 65,60 O; 3458 m.s.n.m.; Localidad: La Quiaca) ubicadas en Jujuy y Orán Aero (Lat., 23,15 S; Lon., 64,32 O; 357 m.s.n.m.; Localidad: Oran) y Tartagal Aero (Lat., 22,52 S; Lon 63,79 O; 500 m.s.n.m.; Localidad: Tartagal) ubicadas en Salta (Figura 1).

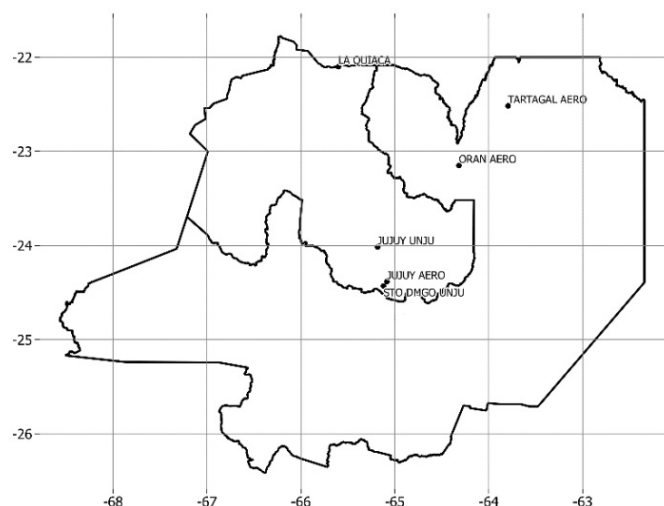


Figura 1. Estaciones de las Provincias de Jujuy y Salta

Estimación de la precipitación

Se utilizó la precipitación diaria obtenida de la técnica CMORPH, provista por el Servicio Meteorológico Nacional. Para acceder a la información se desarrolló una aplicación que realiza la tarea automática de descarga de los datos. La aplicación

utiliza un Protocolo de Transferencia de Archivos (FTP sigla en inglés de File Transfer Protocol), y realiza un filtrado de los datos para el área comprendida entre los límites geoestacionarios (Lat., 21,375 S; Lon., 61,875 O) y (Lat., 26,625 S; Lon., 68,875 O), que incluye a las provincias de Jujuy y Salta. Esta información se presenta por medio de puntos de grilla con una resolución espacial de 0.1° y en forma diaria (Figura 2).



Figura 2. Puntos de grillas de la precipitación diaria por la técnica CMORPH.

Al no coincidir los valores de precipitación de los puntos de grillas con las estaciones en estudio, se recurrió a la interpolación de los mismos mediante la técnica de Kriging, con tres modelos de ajuste del semivariograma: exponencial, esférico y gaussiano. Esta técnica plantea que el valor de la variable puede producirse como una combinación lineal de todos los puntos de grillas intervinientes.

Validación de los modelos de interpolación

La bondad de ajuste de los tres modelos se realizó a través del coeficiente de correlación (R) entre los valores observados y los estimados (Serio y otros, 2007). Además, se calcularon otros estadísticos sugeridos por Willmott (1982): la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), y el sesgo (MBE).

Los menores valores de MAE, se asocian a un método con pocos errores (Villatoro, 2008). El valor RMSE evalúa el error global de la precipitación interpolada diaria. El MBE, determina la desviación

de los datos estimados con respecto a los datos observados, por lo que valores negativos subestimaron, y positivos sobreestimaron (Abad Encalada, 2014).

Evapotranspiración

Para el cálculo de la ET diaria, se utilizó la ecuación de Hargreaves y Samani (1985), la cual necesita datos de temperaturas y Radiación Astronómica. La expresión de estimación puede ser consultada en Murphy y Hurtado (2011).

Se aplicó la ecuación de ajuste propuesta por Moreno y otros, 2014, para los valores de ET mensual.

La ecuación general, permite ajustar los valores medios mensuales de la ET calculadas por H-S a P-M. Considera para el ajuste un coeficiente de correlación $r=0,94$ y un coeficiente de determinación $R^2 = 0,88$ (Moreno y otros, 2014).

Se convirtieron los valores mensuales de ETaj a escala diaria, con una función lineal de tercer orden, obteniéndose los valores climáticos diarios. Esta función permite obtener datos de evapotranspiración diarios en aquellas localidades que cuentan con información diaria (Moreno y otros, 2017).

Constantes Hídricas

Las constantes hídricas del suelo para las localidades en estudios corresponden al trabajo de Alabar y otros, 2016. El cual se basa en la estimación de la capacidad de campo, punto de marchitez y agua útil de 214 asociaciones de suelo a distintas profundidades, para las provincias de Jujuy y Salta, mediante ecuaciones de pedotransferencia. La profundidad de las constantes hídricas que se utilizó corresponde a su efectiva, la cual representa la profundidad hasta donde se pueden desarrollar las raíces de las plantas determinado en un análisis de suelo (Vilma y Arribillaga, 2013).

Balance de agua en el suelo

Con los valores de precipitación diaria, interpolados y validados, precipitación medida en superficie, la ET H-S (1985), ET ajustada diaria, y las constantes hídricas correspondientes a cada asociación que involucra a las localidades en estudio, se estimó la variación temporal del agua en el suelo, por medio de la metodología del BHOA. La misma, queda

representada por dos variables, Almacenes y Excesos (Alm+Exc) (Murphy y Hurtado, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación

Los valores de precipitación interpolados, en los diferentes modelos de ajuste, se distribuyen de

acuerdo al régimen imperante en la región. En todos los modelos no existe un comportamiento regular de los valores, existiendo meses en los que se subestiman o sobrestiman

En la tabla 1, se presentan los valores de R, RMSE, MAE y MBE para los diferentes modelos en las localidades en estudio, y la significancia estadística (SE) para 90 (*), 95 (**) y 99 (***) por ciento.

Estadísticos	Modelos	San Salvador de Jujuy	Santo Domingo	Jujuy Aero	La Quiaca	Oran	Tartagal
R	M. Exponencial	0.30 ***	0.48 ***	0.39 ***	0.21 ***	0.32 ***	0.19 ***
	M. Gaussiano	0.11 ***	0.06 **	-0,02	-0,02	0.09 ***	0.05 **
	M. Esferico	0.34 ***	0.55 ***	0.49 ***	0.24 ***	0.46 ***	0.41 ***
RMSE	M. Exponencial	11,98	10,98	11,79	9,45	15,65	24,19
	M. Gaussiano	11,71	11,27	13,92	11,86	17,32	19,86
	M. Esferico	9,83	9,61	11,10	5,83	10,93	10,33
MAE	M. Exponencial	3,45	3,18	3,43	1,68	4,41	5,31
	M. Gaussiano	3,91	3,50	4,01	2,75	4,94	5,32
	M. Esferico	2,95	2,75	3,07	1,21	3,45	3,48
MBE	M. Exponencial	-0,31	0,32	0,37	0,92	0,68	1,87
	M. Gaussiano	-0,72	-0,28	0,09	1,56	-0,21	0,87
	M. Esferico	-0,93	-0,12	0,39	0,44	-0,35	0,08

Tabla 1. Valores de R y SE al 90 (*), 95 (**) y 99 (***) por ciento, RMSE, MAE y MBE para los diferentes modelos en las localidades en estudios.

El modelo esférico, es el más preciso para la interpolación de precipitación en todas las localidades en estudios (Abad Encalada, 2014; Villatoro, 2008). Los mayores valores de R están presentes en el modelo esférico, siendo éste y el exponencial los que presentan un nivel de significancia al 99 por ciento, en todas las localidades. El modelo gaussiano, presenta una correlación estadística con un nivel de significancia del 99 por ciento, en las localidades de San Salvador de Jujuy y Orán, mientras que en Tartagal y Santo Domingo la SE ocurre a un nivel del 95 por ciento. No existe SE a los niveles estudiados en las localidades de Perico y La Quiaca, para el modelo gaussiano. Las localidades de Santo Domingo y La Quiaca, presentan los valores extremos de R, 0.55 y 0.24, respectivamente, en el modelo esférico.

Los menores valores de MAE y RMSE, se observan utilizando el modelo esférico. La localidad que presenta el mayor error de interpolación es Tartagal (MAE=3.48 mm), y La Quiaca el menor (MAE=1.21 mm). Además, en La Quiaca se presenta

el menor error global de precipitación interpolada diaria (RMSE=5.83 mm), y en Perico el mayor (RMSE=11.10 mm).

Para la localidad de San Salvador de Jujuy, los tres modelos subestiman los valores precipitación, siendo el modelo exponencial en menor magnitud (MBE=-0.31 mm).

En las localidades de Perico, La Quiaca y Tartagal, los modelos sobrestiman los valores interpolados. Los menores valores MBE corresponden al modelo esférico para la localidad de La Quiaca (MBE=0.44 mm) y Tartagal (MBE=0.08 mm), mientras que el gaussiano para Perico (MBE=0.08 mm).

En Santo Domingo y Orán, los modelos esféricos y gaussianos subestiman la precipitación, mientras el exponencial la sobrestima. Ambas localidades presentan menores valores de subestimación que sobrestimación, para Santo Domingo se presenta en el modelo esférico (MBE=-0.12 mm) y en el modelo

gaussiano en Oran (MBE=-0.21 mm).

Se considera que el modelo esférico, es el que mejor realiza la interpolación de la precipitación, ya que posee los mayores valores de asociación (R) entre los datos observados y estimados, y además el RMSE y MAE son los menores, más allá que el MBE no presente los menores valores relativos, en las localidades de San Salvador de Jujuy, Perico y Orán.

Evapotranspiración

En la tabla 2, se muestran los valores de ET estimada por la ecuación de H-S (1985), y los ajustados. La tabla presenta los valores mensuales, ya que en forma diaria implicaría 1095 filas del periodo estudiado para las seis localidades.

Año	Meses	ET H-S (mm/mes)						ET aj (mm/mes)					
		San Salvador de Jujuy	Santo Domingo	Perico	La Quiaca	Oran	Tartagal	San Salvador de Jujuy	Santo Domingo	Perico	La Quiaca	Oran	Tartagal
2014	Ene	168	181	189	145	196	191	141	151	158	121	163	159
	Feb	127	127	135	125	148	148	107	108	114	106	124	124
	Mar	120	124	129	137	131	133	102	105	109	115	110	112
	Abr	94	93	95	111	100	102	80	79	81	94	85	87
	May	80	76	82	90	81	75	69	66	70	77	70	65
	Jun	60	60	64	76	66	66	53	53	56	65	57	57
	Jul	80	80	84	80	92	88	69	69	72	69	79	76
	Ago	114	111	118	100	127	124	97	94	100	85	107	105
	Sep	133	131	139	127	142	142	112	111	117	107	119	120
	Oct	168	161	144	146	195	197	141	135	121	122	162	164
	Nov	162	161	173	158	174	163	135	135	145	133	145	136
	Dic	160	162	177	170	187	182	134	136	148	142	156	152
2015	Ene	163	170	178	139	180	188	136	142	149	117	150	157
	Feb	127	132	137	123	149	153	107	111	115	104	125	128
	Mar	115	121	127	127	141	146	98	103	107	108	118	122
	Abr	91	82	98	105	100	106	78	70	83	89	85	90
	May	74	79	78	89	76	75	64	68	67	77	66	65
	Jun	72	67	73	82	68	68	63	58	64	71	60	59
	Jul	78	74	80	80	85	86	67	64	69	69	73	74
	Ago	103	99	108	105	111	116	87	85	92	89	94	98
	Sep	121	121	128	127	140	134	102	102	108	108	118	113
	Oct	138	138	147	154	162	164	116	116	123	129	135	137
	Nov	142	144	153	169	162	164	119	121	128	141	136	138
	Dic	180	171	190	173	194	189	150	143	158	145	161	157
2016	Ene	160	167	177	157	188	190	134	140	148	131	157	158
	Feb	138	140	149	135	157	158	116	118	125	114	131	132
	Mar	113	114	120	146	127	131	96	96	101	123	107	110
	Abr	89	90	95	119	97	106	76	77	81	100	83	90
	May	52	57	62	96	67	72	47	50	55	82	58	62
	Jun	47	51	55	77	59	63	42	45	49	66	52	55
	Jul	69	71	75	87	78	83	60	62	65	74	67	71
	Ago	105	107	113	102	126	128	89	91	96	87	106	108
	Sep	124	126	134	125	150	151	104	106	113	106	126	126
	Oct	152	152	157	151	167	166	127	127	131	126	140	139
	Nov	157	160	164	153	170	171	132	134	137	128	142	143
	Dic	164	170	179	159	187	191	137	142	150	133	156	159

Tabla 2. Valores mensuales de ET H-S y ET aj.

Al realizarse el ajuste, se observa una disminución de los valores de ET. La ecuación involucra una

función lineal, la cual produce una reducción que se generaliza al aplicarla en cada localidad.

Constantes Hídricas

La tabla 3, muestra los valores de constantes hídricas, a profundidad efectiva, utilizadas para la estimación de agua en suelo.

Asociación	Localidad	Nomenclatura	Prof. Efectiva (cm)	Constantes Hídricas (mm)	
				CC	PM
Palpalá	San Salvador de Jujuy	(Pp)	100	350	190
Perico	Santo Domingo	(Pe)	100	254	106
	Jujuy Aero				
Abra Pampa	La Quiaca	(Ap)	100	256	165
Orán	Oran	(Or)	50	87	32
Vespucio	Tartagal	(Vp)	84	194	88

Tabla 3. Constantes hídricas consideradas para la estimación de agua en el suelo.

La asociación Palpalá, con una profundidad de 100 cm, presentó los valores máximos de CC (350) y PM (190). En la asociación Orán, se encontraron los menores valores de CC (87) y PM (32), a una profundidad efectiva de 50 cm.

Estimación de agua en el suelo

Las figuras 3 a 8, muestran la estimación de agua en el suelo diaria, utilizando la metodología del BHOA. El balance, en general, constituye una relación de lo que ingresa por precipitación y lo que egresa por demanda atmosférica (ET), por ello se realizaron cuatro combinaciones de datos ingresados para la

estimación de agua en el suelo que corresponden a:

- Precipitación medida en superficie y Evapotranspiración por H-S (1985) (PP sup_ET H-S).
- Precipitación medida en superficie y Evapotranspiración ajustada (PP sup_ET aj).
- Precipitación interpolada por el modelo esférico y Evapotranspiración por H-S (1985) (PP inter_ET H-S).
- Precipitación interpolada por el modelo esférico y Evapotranspiración ajustada (PP inter_ET aj).

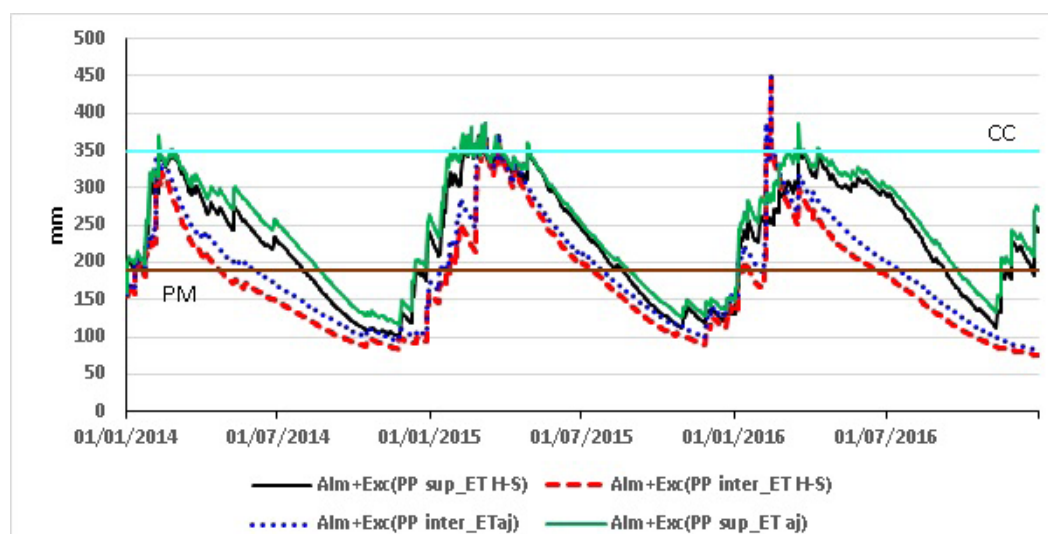


Figura 3. Estimación de agua en el suelo, para San Salvador de Jujuy.

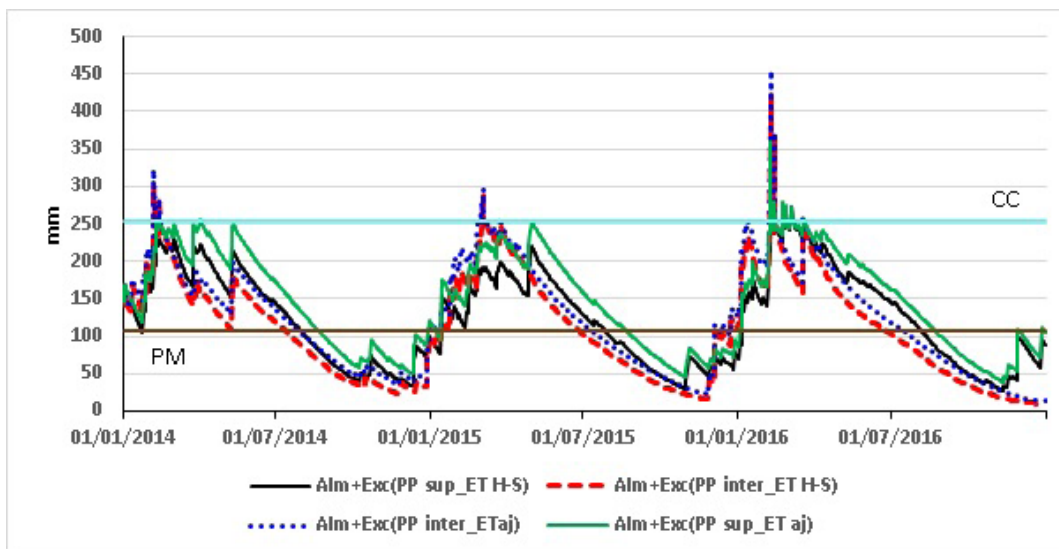


Figura 4. Estimación de agua en el suelo, para Santo Domingo.

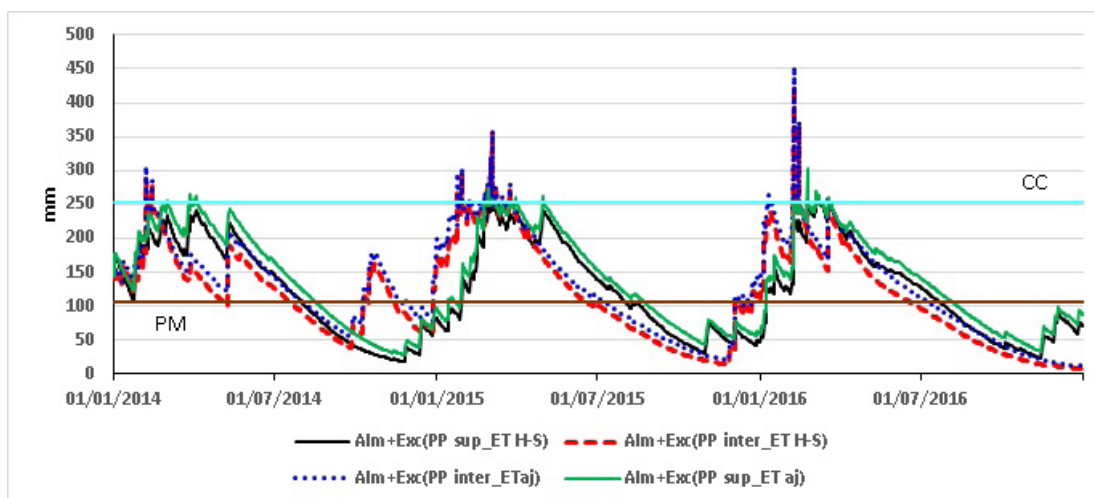


Figura 5. Estimación de agua en el suelo, para Perico.

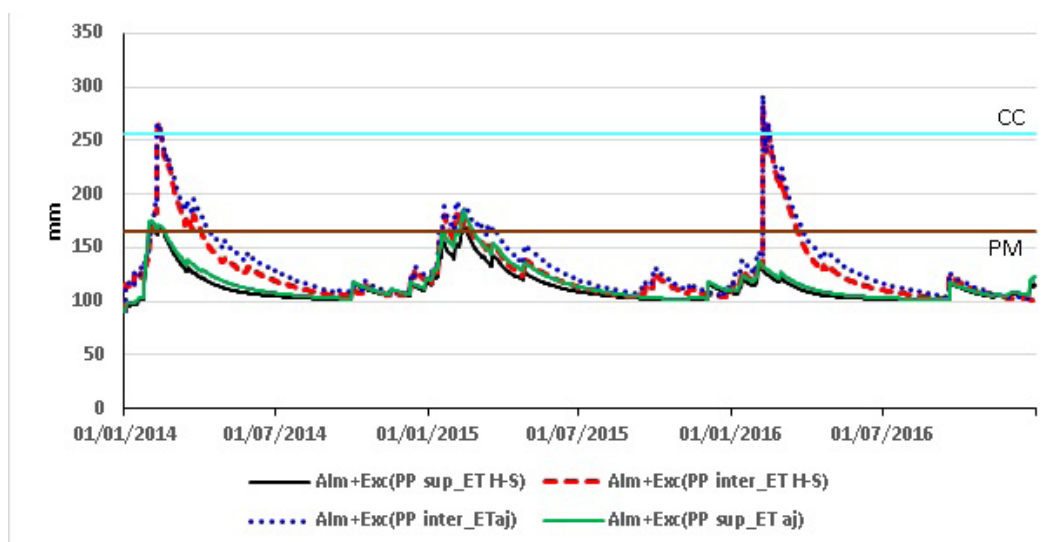


Figura 6. Estimación de agua en el suelo, para La Quiaca.

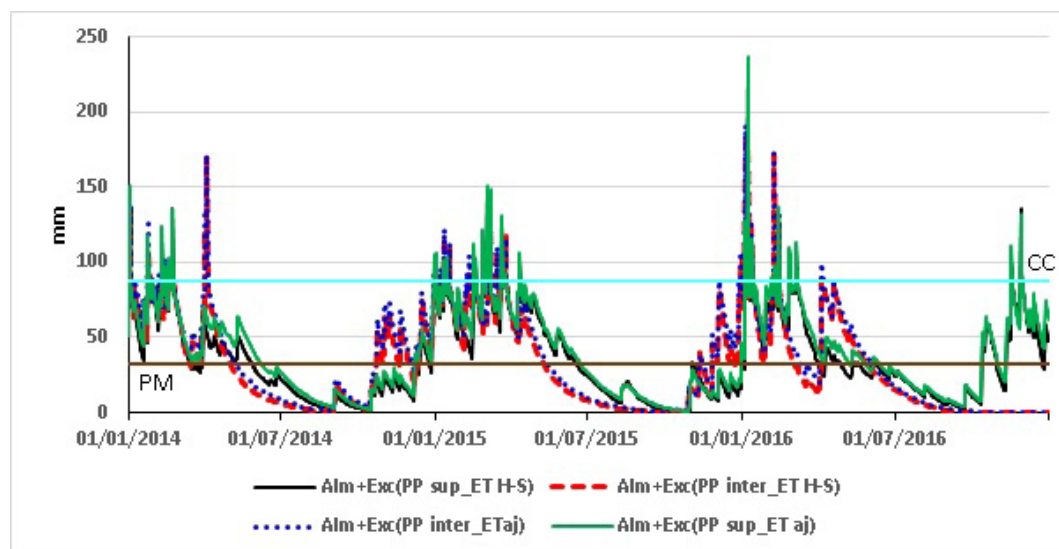


Figura 7. Estimación de agua en el suelo, para Orán.

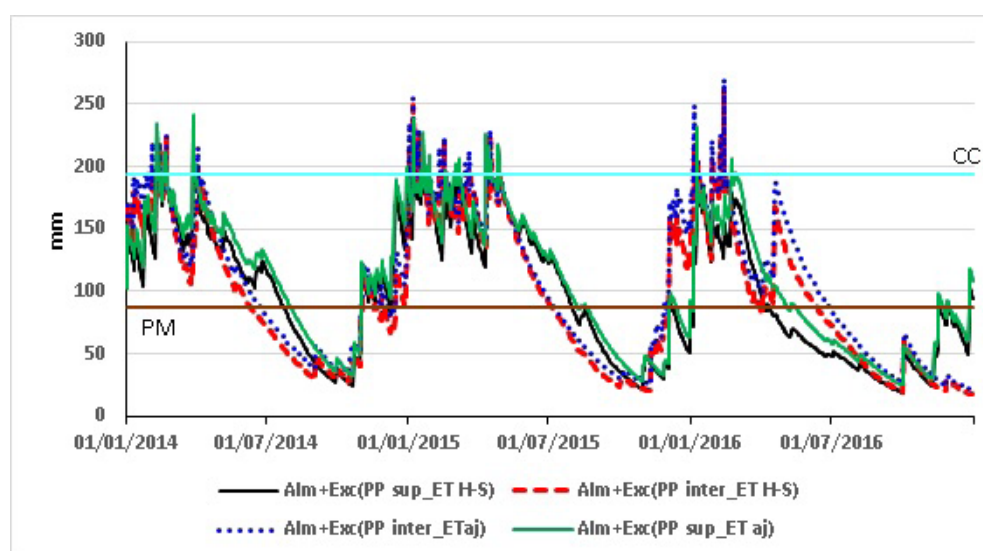


Figura 8. Estimación de agua en el suelo, para Tartagal.

El agua en el suelo, calculado con datos interpolados y ajustados, sigue el mismo patrón de variación que la estimada con valores medidos en superficie, con una SE del 99 por ciento en todas las localidades (tabla 4), por lo que el agua en el suelo resulta una herramienta útil para las planificaciones agrícolas (Severina y otros, 2012; Andriani, 2012; Botey y otros, 2009; Fernández Long y otros, 2012). Las estimaciones de agua en el suelo, calculada con ET_{aj}, tienden a ser mayor o igual independientemente del valor de precipitación considerado en todas las localidades.

En la tabla 4, se presentan los valores de R, considerando la relación entre la estimación de agua en el suelo calculada con la PP sup y la ET H-S “Alm+Exc(PP sup_ET H-S)” y las demás combinaciones de agua en el suelo (Alm+Exc(PP inter_ET H-S), Alm+Exc (PP inter_ET aj), Alm+Exc (PP sup_ET aj)) para la estimación de agua en suelo, y la significancia estadísticas (SE) para 90 (*), 95 (**) y 99 (***) por ciento.

Localidad	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP inter_ET H-S)	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP inter_ETaj)	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP sup_ET aj)
San Salvador de Jujuy	0.868***	0.886***	0.993***
Santo Domingo	0.893***	0.887***	0.992***
Perico	0.755***	0.745***	0.997***
La Quiaca	0.732***	0.740***	0.992***
Oran	0.665***	0.655***	0.991***
Tartagal	0.839***	0.811***	0.994***

Tabla 4. Valores de R y SE al 90 (*), 95 () y 99 (***) por ciento, para la estimación de agua en el suelo calculada con la PP sup y la ET H-S “Alm+Exc (PP sup_ET H-S)” y las demás combinaciones (Alm+Exc (PP inter_ET H-S), Alm+Exc (PP inter_ET aj), Alm+Exc (PP sup_ET aj)).**

Se observa que en todas las localidades se obtiene un valor de significancia del 99 por ciento. Los mayores valores de asociación corresponden a la calculada con PP sup y ET aj, y de cada una de ellas la localidad de Perico, la mayor ($R=0.997$), probablemente debido a que la variación del agua en el suelo está más relacionada con la precipitación en superficie.

La combinación de agua en el suelo calculada con PP inter y ET H-S, presenta valores de correlación mayores en cuatro de las seis localidades que utilizando la PP inter y ETaj.

Debido a que se observan diferencias en las distintas épocas de año, se realizó el mismo tipo de relación que en el caso anterior, pero por estación

del año considerando a ellas como, Verano: Enero a Marzo, Otoño: Abril a Junio, Invierno: Julio a Septiembre y Primavera: Octubre a Diciembre, la cual nos ayuda a identificar las épocas donde existe una mayor o menor asociación, y los ajustes a realizar en el futuro.

La tabla 5, muestra los coeficientes de correlación por época del año considerando la relación entre la estimación de agua en el suelo calculada con la PP sup y la ET H-S “Alm+Exc(PP sup_ET H-S)” y las demás combinaciones de agua en el suelo (Alm+Exc(PP inter_ET H-S), Alm+Exc (PP inter_ET aj), Alm+Exc (PP sup_ET aj)) con significancia estadística (SE) de 90 (*), 95 (**) y 99 (***) por ciento.

Localidad	Estaciones	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP inter_ET H-S)	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP sup_ET aj)	Alm+Exc(PP sup_ET H-S)-Alm+Exc (PP inter_ETaj)
San Salvador de Jujuy	Verano	0.74***	0.97***	0.79***
	Otoño	0.84***	0.98***	0.87***
	Invierno	0.84***	0.99***	0.88***
	Primavera	-0.37***	0.99***	-0.44***
Santo Domingo	Verano	0.68***	0.97***	0.58***
	Otoño	0.61***	0.95***	0.67***
	Invierno	0.97***	0.99***	0.96***
	Primavera	0.21***	0.97***	0.16***
Perico	Verano	0.28***	0.99***	0.13***
	Otoño	0.66***	0.99***	0.64***
	Invierno	0.94***	1.00***	0.90***
	Primavera	-0.47***	0.99***	-0.48***
La Quiaca	Verano	0.32***	0.99***	0.36***
	Otoño	0.52***	1.00***	0.54***
	Invierno	0.65***	0.98***	0.60***
	Primavera	0.32***	0.99***	0.26***

Oran	Verano	0.64***	0.99***	0.65***
	Otoño	0.44***	0.97***	0.47***
	Invierno	0.54***	0.98***	0.52***
	Primavera	-0.31***	0.99***	-0.32***
Tartagal	Verano	0.54***	0.95***	0.48***
	Otoño	0.73***	0.99***	0.59***
	Invierno	0.82***	1.00***	0.77***
	Primavera	0.56***	1.00***	0.54***

Tabla 5. Valores de R y SE al 90 (*), 95 () y 99 (***) por ciento estacional, para la estimación de agua en el suelo calculada con la PP sup y la ET H-S “Alm+Exc (PP sup_ET H-S)” y las demás combinaciones (Alm+Exc (PP inter_ET H-S), Alm+Exc (PP inter_ET aj), Alm+Exc (PP sup_ET aj)).**

En todas las localidades, se observa SE al 99 por ciento. El R estacional calculado con la PP sup y ET aj, presenta los mayores valores en todas las localidades. En la localidad Santo Domingo en otoño, y Tartagal en verano presenta los menores con 0.95, y los mayores en Tartagal en invierno y primavera, La Quiaca en otoño y Perico en invierno con 1.

Con respecto a las otras dos combinaciones, las relaciones de acuerdo a la época del año no presentan una homogeneidad en el comportamiento de las asociaciones. En el verano los mayores valores de R se dan en San Salvador de Jujuy con la combinación de PP inter y ET aj y el menor en Perico. En otoño los valores de R aumentan considerablemente entre 0.87 (PP inter y ET aj) y 0.44 (PP inter y ET H-S), en la localidades de San Salvador de Jujuy y Orán, respectivamente.

Para el invierno se dan los mayores coeficientes de correlación correspondiendo un valor de 0.97 (PP inter y ET H-S) para Santo Domingo y el menor, de 0.52 (PP inter y ET aj) en Orán.

Los menores valores de asociación se dan en primavera y sus valores oscilan entre 0.56 (PP inter y ET H-S) y 0.16 (PP inter y ET aj), para Tartagal y Santo Domingo, respectivamente. Sin embargo, se observan correlaciones inversas.

CONCLUSIONES

El BHOA, con valores de ET aj, constantes hídricas estimadas por ecuaciones de pedotransferencia y precipitación interpolada con un modelo validado, permite cuantificar la disponibilidad espacial y temporal de agua en suelo. La estimación de agua edáfica

calculada por esta metodología, sigue el patrón de variación imperante de la región, lo que la convierte en una herramienta de planificación agropecuaria.

La validación de los modelos de interpolación Kriging, aplicado a las precipitaciones estimadas por la técnica CMORPH, es una alternativa para conocer la veracidad de la interpolación y de los datos satelitales. En la selección del modelo de interpolación, es necesario contar con más de un estadístico al momento de establecer el algoritmo que mejor se adapte.

El ajuste de la ET posibilita conocer la pérdida de agua por evaporación y transpiración de las plantas, si en la localidad no existieran datos para el cálculo de la ET con base físico matemático, como la estimación por Penman-Monteith (FAO 56).

El metodo del BHOA, permite realizar un seguimiento diario del agua edáfica en aquellos lugares que no dispongan de toda la información agroclimática para su cálculo. A nivel provincial, las constantes hídricas se encuentran determinadas en el trabajo de Alabar y otros, 2016, para la profundidad de 30, 70 y 100 cm y profundidad efectiva. Los valores climáticos diarios de ET se hallan disponibles en una base de dato del trabajo de Moreno y otros, 2017. La resolución espacial de la precipitación estimada por la técnica CMORPH cubre toda el área de la provincia de Jujuy y Salta. Por ello, el trabajo analiza los modelos de interpolación Kriging, que mejor se adapte a la región, para que el mismo pueda ser utilizado en otras localidades que dispongan datos de la demanda atmosférica, de manera que al utilizar el BHOA, o cualquier modelo de estimación de agua en el suelo, y las constantes hídricas permitan realizar el seguimiento diario del agua en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado dentro del marco de la Beca Estímulo a las Vocaciones Científicas del Consejo Interuniversitario Nacional (CIN) 2015/2017.

BIBLIOGRAFÍA

Abad Encaladas, I. O. 2014. Estimación de precipitación espacial mediante correlación con variables secundarias y la ayuda de tecnologías de información geográfica. Tesina para obtener el título Magister en Geomática. Consultado en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19857/1/Tesis.pdf>

Alabar, F.; Hurtado, R. Arias, P.; Mayo, H.; Hormigo, D.; Moreno, C.; Portal, M.; Valdiviezo Corte, M.; Spescha L.; Riquelme, A. 2016. Determinación de las constantes Hídricas de Jujuy y Salta a nivel de Asociación, para el monitoreo del agua en el suelo. Proceso de publicación: http://www.siaj.fca.unju.edu.ar/media/publicaciones/CC-Jujuy_y_Salta_8.pdf

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". En la ciudad de Piriápolis. Uruguay. Pág: 103-104. ISBN 978-987-688-082-4.

Andriani, J. 2012. "Bahicu" (Balance Hídrico de cultivos extensivos). Consultado en: <http://inta.gob.ar/documentos/software-balance-hidrico-de-cultivos-extensivos>

Botey, R.; Pérez-Arias, J.; Moreno, J.V. 2009. Estimación del contenido de agua del suelo mediante el balance hídrico exponencial diario y comparación con medidas in situ en un suelo "Typic Haploxeralf" en la zona centro (Madrid-España). Consultado en: <http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications/p303.pdf>

Botey, R.; Moreno García, J. M. 2015. Metodología para estimar la humedad del suelo mediante un balance hídrico exponencial diario. Consultado en: www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/balance_hidrico/Metodologia.pdf

Camargo, A. P. 1971. Balanço hídrico no estado de São Paulo. 3. ed. Campinas: IAC. Boletim n.116. 24 pág.

Collado, J. 1988. Estimación óptima de la precipitación media con el método Kriging. Consultado en: http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/1222/1/RIH_023.pdf

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, Nº 2: Págs. 77-88.

Della Maggiora, A.; Irigoyen, A.; Gardiol, J. 2010. Programa de balance de agua del suelo aplicado a cultivos. XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología. Bahía Blanca – Argentina. Págs 356-357.

Fernández-Long, M.E.; Spescha, L.; Barnatán, I.; Murphy, G. 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). Consultado en: <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/agronomiayambiente/2012fernandezlong.pdf>

Ferraro, R. R. 1997. SSM/I derived global rainfall estimates for climatological applications. J. Geophys. Res., 102, 16 715–16. Pág. 735.

Ferraro, R. R.; Weng, F.; Grody, N. C.; Zhao, L. 2000: Precipitation characteristics over land from the NOAA-15 AMSU sensor. Geophys. Res. Lett., 27, Págs. 2669–2672.

Gallardo, A. 2006. Geoestadística aplicada. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. Consultado en: www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=431&Id_Categoria=1&tipo=portada.

Gebremichael, M.; Krajewski, W. F.; Morrissey, M.L.; Huffman, G.J.; Adler, R.F. 2005. A Detailed Evaluation of GPCP 1° Daily Rainfall Estimates over the Mississippi River Basin. J. App. Meteor. 44: Pág. 665-681.

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

Henao, R. G. 2009. Introducción a la Geoestadística. Cap.4: Predicciones espaciales. Pág. 32-61. Consultado en: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/projects/Cursos_Talleres/Curso_R/DOCUMENTOS/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA.pdf

Huffman, G. J.; Adler, R.F; Bolvin, D.T.; Gu, G.; Nelkin, E.J.; Bowman, K.P.; Yang, H.; Stoker, E. F.; Wolff, D.B. 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeor.*, 8: Págs. 38-55.

Joyce, R. J.; J.E. Janowiak; P.A. Arkin and P. Xie. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeor.*, 5: Pág. 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. *J. Hydrometeor.*, 4: Págs. 1088-1104.

Kummerow, C.; Y. Hong, WS Olson, S.; Yang, RF Adler, J.; McCollum, R.; Ferraro, G.; Petty, DB.; Wilheit, T.T. 2001: La evolución del algoritmo de perfiles de Goddard (GPROF) para la estimación de precipitaciones a partir de sensores de microondas pasivos. *J. Appl. Meteorito.*, 40, Págs. 1801-1820.

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. Pág: 71-72. Acta de Reunión Binacional Uruguay - Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología. Piriápolis, Uruguay. ISBN 978-987-688-082-4

Moreno, C.; Hurtado, R. H.; Portal, M. R.; Valdiviezo Corte, M.; Riquelme, A.; Alabar, F.; Mayo, H. 2017. Comparación de métodos de Evapotranspiración para ajustar a la metodología de Penman-Monteith (FAO 56), para las localidades del Noroeste Argentinos. En proceso de publicación.

Murphy, G.; Hurtado, R. 2011. Agrometeorología. Parte 1. Fundamentos de meteorología y climatología. Sección VII. El ciclo del agua. VII.3 Evaporación y Evapotranspiración. Pag: 85-102. ISBN: 978-950-29-1324-7.

Osinaga, R; Paoli, H. 2009. Adecuación a un Sistema de Información Geográfica del estudio de "Los Suelos del NOA (Salta y Jujuy) Nadir y Chafatinos, 1990". Consultado en: <http://inta.gob.ar/documentos/adecuacion-a-un-sistema-de-informacion-geografica-del-estudio-los-suelos-del-noa-salta-y-jujuy-nadir-a.-chafatinos-t.-1990/>.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open wáter, bare soil and grass. *Royal Soc. London Proc. Ser. A.* 193: Págs. 120-146.

Pineda, C.; Vilorio, 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.* Vol. 5, Nº 1 y 2: 39-45. ISSN: 1315-0359.

Saxton, K. 2009. Soil-Plant-Atmosphere-Water Field & Pond hidrology. USDA. Agricultural Research Service. Consultado en: <http://ars.usda.gov/ba/anri/hrsl/ksaxton>.

Serio, L.; Spescha, L.; Murphy, G. 2007. Validación de las precipitaciones decádicas en la región pampeana estimadas por el modelo atmosférico del ECMWF. Consultado 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-

Severina, I.; Giubergia, J.P.; Salinas, A.; Martellotto, E.; Arce, A.; Boccardo, M.; y Andriani, J. 2012. Validación de dos métodos de balance hídrico en el cultivo de trigo bajo riego suplementario, en la región central de Córdoba. 1era ed. Manfredi. Córdoba (AR). Ediciones INTA. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. ISSN 1851 -4081. Pág. 16.

Thornthwaite C.W. 1945. El agua en la agricultura. Comisión Nacional de Irrigación, México. Pág. 14.

Thornthwaite, C.W. 1948. Una Aproximación a una Clasificación Racional del Clima. *Geogr. Rev.* 38: Págs. 55-94.

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.

Consultado en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/viewFile/6773/6460>

Vilma, R. C.; Arribillaga, D. G. 2013. Potencial Productivo en Base a la Profundidad de los Suelos del Valle de Chile Chico. Consultado en: <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR39013.pdf>

Willmot, C. J. 1982. Some commentas on the evaluation of model perfomance. Bulletin of the American Meteorological Society 63. Pags. 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. Consultado en: <http://www.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.39.pdf>