

ANÁLISIS PERIÓDICO DE LAS CONDICIONES HIDROLÓGICAS EN LA PROVINCIA DE CÓRDOBA, ARGENTINA

PERIODIC ANALYSIS OF HIDROLOGICAL CONDITIONS IN THE PROVINCE OF CORDOBA, ARGENTINA

A.C. DE LA CASA Y O.B. NASELLO

Facultad de Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de Córdoba. e-mail: delacasa@agro.unc.edu.ar
Facultad de Matemática Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba. IFEG CONICET.
Medina Allende s/n Ciudad Universitaria (5000) Córdoba, Argentina. e-mail: nasello@famaf.unc.edu.ar

Recibido: 8/10/15; aceptado: 14/12/15

El cambio climático global impacta directamente sobre la disponibilidad de agua de una región alterando los regímenes de precipitación (PP) y el proceso de evapotranspiración (ET). En el territorio central de la Argentina estas dos variables han presentado tendencias diferentes en el período 1940-2010. Mientras la evapotranspiración potencial (ETP) no presenta signos de cambio evidentes, la PP ha experimentado un incremento significativo, mostrando además una sucesión regular de puntos de quiebre, cada 10 años aproximadamente, entre períodos con tendencias opuestas. La condición hidrológica de una región resulta difícil de medir de manera directa, continua y prolongada, por lo que suele estimarse mediante modelos de balance de agua. En este trabajo se evalúa el comportamiento hidrológico de la región central de Argentina utilizando la información meteorológica del conjunto de 7 estaciones localizadas en la provincia de Córdoba para el período 1970-2012, y en Pilar también una serie más prolongada que comienza en 1925. A partir de registros de PP y valores estimados de ETP se calculó el balance de agua climático regional usando el procedimiento de Thornthwaite, y las variables de entrada y de salida del modelo se evaluaron con el método no-lineal de Tomé-Miranda. Los resultados muestran que el balance hídrico, representado por la deficiencia de agua, manifiesta períodos que tienen una frecuencia similar a PP y a ETP, con una relación inversa en el primer caso y directa en el segundo, pero alcanzando un estándar más significativo como indicador del estado atmosférico cuando se lo contrasta con el comportamiento de indicadores de la variabilidad climática como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO). También se observa una relación inversa entre la evolución de las pendientes parciales de PP y ETP, de modo que los episodios de falta de agua (deficiencia) se ven agravados no sólo por la merma de la lluvia sino también por el aumento de la demanda atmosférica.

Palabras clave: balance hidrológico, deficiencia de agua, tendencias parciales, PDO.

Global climate change has a direct impact on the availability of water from region altering precipitation (PP) and evapotranspiration (ET) regimes. In the central territory of Argentina these two variables have presented different trends in the period 1940-2010. While the potential evapotranspiration (PET) has no obvious signs of change, the PP has experienced a significant increase, also showing a regular succession of break points, every 10 years or so, with opposite trends between periods. The hydrological condition of a region is difficult to measure directly, continuous and prolonged, so usually it is estimated by water balance models. In this paper the hydrological behavior of the central region of Argentina using meteorological data of all 7 stations located in the province of Córdoba for the period 1970 to 2012, and also a longer Pilar series starting at 1925 are evaluated. From PP records and estimated values of the ETP regional climate water balance was calculated using the method of Thornthwaite. Both the input variables and model output were evaluated with the non-linear method of Tomé-Miranda. The results show that the water balance, represented by water deficiency, manifests periods that have similar frequency PP and PET, with an inverse relationship in the first case and directly in the second, but, reaching a more significant standard as indicator atmospheric state when it is contrasted with the behavior of indicators of climate variability such as the Pacific Decadal Oscillation (PDO). An inverse relationship between the evolution of partial slopes PP and PET is also noted, so that episodes of water shortage (deficiency) are compounded not only by reduced rainfall but also by increased atmospheric demand.

Keywords: water balance, water deficiency, partial trends, PDO.

I. INTRODUCCIÓN

Mientras el calentamiento de la atmósfera terrestre desde finales del siglo XIX ha sido establecido entre 0,3 y 0,6°C (Trenberth et al., 2007), el estudio de la variación de otros parámetros climáticos relacionados

con el ciclo hidrológico tales como precipitación, nubosidad y evaporación, muestran tendencias muy variables, tanto a escala global como regional (New et al., 2001; de la Casa y Nasello, 2010). Estos cambios impactan directamente sobre la disponibilidad de agua de una región ya que alteran los regímenes de

precipitación (PP) y el proceso de evapotranspiración (ET) (Sun et al., 2008). La evapotranspiración de referencia (ET_0), que a escala mundial presenta predominantemente tasas decrecientes (McVicar et al., 2013), no muestra signos evidentes de cambio en la región central de Argentina entre 1941 y 2010, en tanto la PP ha experimentado un incremento significativo en el mismo período (de la Casa y Ovando, 2014). Además de esta tendencia general, de la Casa y Nasello (2011) determinaron variaciones casi periódicas de la lluvia anual en la provincia de Córdoba a partir del método de tendencias parciales de Tomé-Miranda (T-M) (2004), mostrando una sucesión regular de puntos de quiebre cada 10 años aproximadamente.

Con respecto a la disponibilidad de agua, cuando el comportamiento hidrológico de una región se aparta en términos extremos de su condición media, los dos estados antagónicos que resultan: abundancia (exceso) y carencia (deficiencia), no sólo ocasionan perjuicios directos a la producción agropecuaria (Motha y Baier, 2005), también repercuten sobre los recursos hídricos del territorio y, de manera particular en Córdoba, Argentina, en la provisión de energía eléctrica. En razón que estas contingencias son difíciles de medir de manera directa, continua y prolongada, la dinámica hídrica se suele estimar a partir de procedimientos de balance hidrológico. Estas herramientas permiten evaluar en distintas escalas de tiempo y espacio, y en términos tanto retrospectivos como prospectivos, los cambios de la disponibilidad de agua del suelo en virtud de la interacción entre la oferta, conformada por la PP y la humedad del suelo, y la demanda atmosférica de agua, representada por la ET Potencial (ETP) o de referencia (ET_0). Mientras la ocurrencia de excesos está circunscripta a valores positivos de (PP-ETP) una vez que se supera la capacidad máxima de retención de agua del suelo, la deficiencia de agua (Def) se establece como la diferencia entre ETP y ET Real (ETR), cuyo valor se obtiene en función de PP y la variación del almacenaje de agua (Tateishi y Ahn, 1996; McCabe y Markstrom, 2007).

Los modelos de balance de agua se utilizan con múltiples propósitos: cuantificar los distintos componentes del ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración y escurrimiento (McCabe y Markstrom, 2007); estimar el balance de agua global (Legates y McCabe, 2005); desarrollar clasificaciones climáticas (Thornthwaite, 1948); estimar el almacenaje de agua del suelo (Mintz and Serafini, 1992) y el escurrimiento superficial (Wolock and McCabe, 1999); determinar la necesidad de riego de los cultivos (McCabe and Wolock, 1992); y analizar la repercusión hidrológica del cambio climático (Strzepek and Yates, 1997; Wolock and McCabe, 1999).

A partir de un análisis espectral de frecuencia, de la Casa y Ovando (2005) determinaron la variación secular de la deficiencia y el exceso de agua, usando

modelo de balance de agua, en una transecta de la región central de Argentina. La primera armónica muestra la existencia de una onda de largo plazo que corresponde al período completo de 126 años, con un máximo (mínimo) de la deficiencia (exceso) que coincide con la intensa sequía que experimentó una gran parte de la Argentina en la década del 30 (Rodríguez de Lucero, 1977). Desde entonces, en el territorio central de la Argentina se ha registrado una tendencia creciente de la lluvia (Lucero y Rozas, 2002; Ravelo et al., 2002; de la Casa y Nasello, 2009) que, no sólo desplazó la frontera agrícola hacia el oeste de la región (Sierra et al., 1995; Viglizzo et al., 1995) e incrementó la aptitud productiva del territorio (de la Casa y Ovando, 2014), también ha tenido una influencia notable sobre los sistemas hidrológicos de esta región (Vicario, 2008).

Las tendencias observadas son parte de la variabilidad climática global, que suelen ser analizadas utilizando diversos índices o indicadores (Wang y Schimel, 2003). La Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) es uno de estos indicadores que expresa el modo que adquiere la variabilidad climática del Pacífico, de manera similar a la manifestación del El Niño-Oscilación Sur (ENSO por su sigla en inglés), pero presenta variaciones de mayor escala de tiempo. El patrón espacial del PDO es cualitativamente similar al del ENSO, con grandes anomalías de la temperatura de la superficie del mar (SST) de un signo en el Pacífico tropical y Noreste y con anomalías del signo opuesto en el Pacífico Norte Central. La señal del PDO es más evidente sobre las regiones extratropicales del Pacífico Norte y América del Norte y resulta más débil sobre los trópicos, en oposición al ENSO que presenta una señal dominante sobre las regiones Tropicales y es más débil en las extratropicales (Wang y Schimel, 2003). El índice PDO se utiliza satisfactoriamente para predecir el clima en el norte de América y está altamente correlacionado con el índice NOA (Oscilación del Atlántico Norte) el cual, a su vez, esta correlacionado con las variaciones climáticas observadas en Europa (Schwing et al., 2003). Además, también se ha observado que el calentamiento del oeste de la península Antártica está vinculado a los cambios de la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical (Ding et al., 2011).

En el presente trabajo se analiza la variación de la disponibilidad de agua en la provincia de Córdoba, Argentina, en el periodo 1970-2012, a partir de los resultados del balance de agua climático regional de Thornthwaite. La deficiencia hídrica estimada con este modelo se analiza, a fin de establecer su comportamiento periódico, por medio de la rutina de pendientes parciales y puntos de quiebre de Tomé-Miranda (T-M). La información obtenida se compara con la que producen los registros de PP, a los efectos de determinar la capacidad predictiva de ambas variables como indicadores de la variabilidad y cambio climático de acuerdo a la señal del PDO.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

El comportamiento hidrológico de la región central de Argentina se evaluó espacialmente con la información meteorológica del conjunto de estaciones localizadas en la provincia de Córdoba, que se encuentran ubicadas geográficamente como se detalla en la Tabla 1

Los indicadores hidrológicos deficiencia (Def) y exceso (Exc) de agua se obtuvieron procesando el Balance Hídrico Climático (BHC) de Thornthwaite, utilizando el programa desarrollado por McCabe y Markstrom (2007) a escala mensual de manera secuencial o seriada. El BHC permite obtener la información acerca de Def y Exc realizando el cálculo del almacenaje de agua del suelo (ST), de acuerdo a las condiciones de Evapotranspiración Potencial, estimada en base a la temperatura (T) de la región en estudio, el total de precipitación (PP) y el aporte de agua en forma de nieve (Pn). En nuestro caso se consideró la lluvia (P) igual a PP ya que las nevadas en la región son poco frecuentes y de escasa magnitud, siendo insignificante el aporte de agua de su almacenamiento previo. Teniendo en cuenta el agua del suelo almacenada en el periodo anterior. El comportamiento hidrológico de la región central de Argentina se evaluó espacialmente con la información meteorológica del conjunto de estaciones localizadas en la provincia de Córdoba, que se encuentran ubicadas geográficamente como se detalla en la Tabla 1

TABLA 1. Localización geográfica, elevación y capacidad máxima de retención de agua del suelo (STC) de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Estación meteorológica	id	Latitud	Longitud	Elevación m s.n.m.	STC (mm m ⁻¹)
Villa de María de Río Seco	VMRS	29°54' S	63°41' W	341	250
Córdoba Aero (Pajas Blancas)	PB	31°19' S	64°13' W	474	250
Pilar Observatorio	PI	31°40' S	63°53' W	338	250
Villa Dolores Aero	VD	31°57' S	65°08' W	569	200
Marcos Juárez Aero	MJ	32°42' S	62°09' W	114	300
Río Cuarto Aero	RC	33°07' S	64°14' W	421	250
Laboulaye Aero	LB	34°08' S	63°22' W	137	300

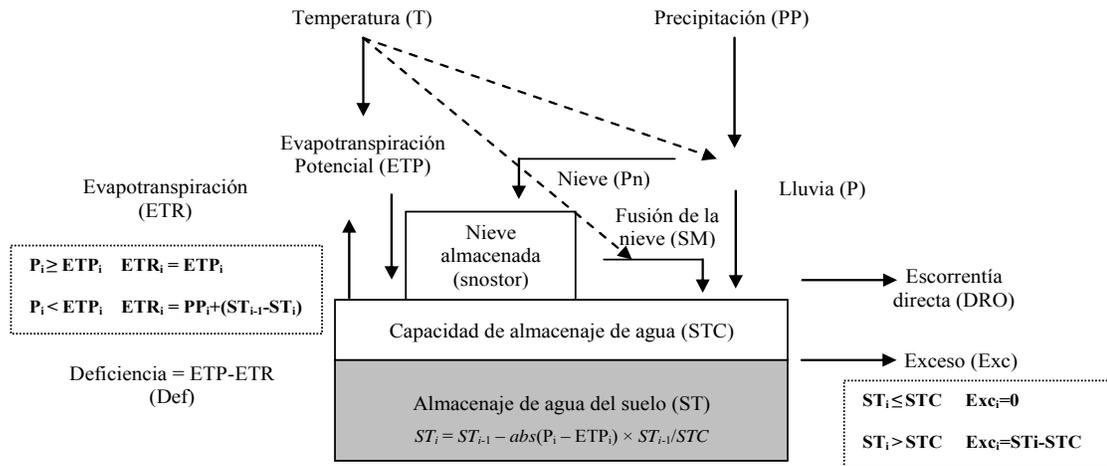


Figura 1. Diagrama del modelo de Balance Hídrico Climático (BHC) de Thornthwaite.

El modelo del BHC presenta el diagrama que muestra la Figura 1, donde se indican las diferentes alternativas que se pueden presentar para la determinación tanto de la Deficiencia ($Def_i = ETP_i - ETR_i$) como del Exceso de agua ($Exc_i = ST_i - STC$) correspondiente al i-ésimo período mensual.

Los datos básicos utilizados en el desarrollo de este trabajo fueron la precipitación y la temperatura máxima y mínima a escala diaria (T_{max} y T_{min} , respectivamente), a partir de los cuales se obtuvieron los correspondientes valores mensuales. La evapotranspiración potencial (ETP mm mes⁻¹), es decir la tasa máxima de evaporación por mes de una

superficie completamente sombreada por un cultivo verde, sin limitación en el suministro hídrico se estimó de acuerdo con la siguiente expresión (Hamon, 1961):

$$ETP = 13,97 \times d \times D^2 \times W$$

Donde d es el número de días de cada mes, D es la duración del día media mensual expresada en unidades de 12 horas, y W es la densidad promedio del vapor de agua saturado ($g\ m^{-3}$), calculada por:

$$W = \frac{4,95 \times e^{0,062 \times T}}{100}$$

Siendo T la temperatura media mensual ($^{\circ}C$), obtenida a partir de las temperaturas media diaria $Tm=(Tmax-Tmin)/2$

Las series de PP, ETP y Def fueron sometidas al análisis no-lineal de pendientes parciales de Tomé y Miranda (2004) (T-M). Este algoritmo determina la mejor combinación de segmentos continuos que minimiza la suma de los residuos al cuadrado (Best fit) (de la Casa y Nasello, 2012). Las tendencias parciales se obtienen con la condición de que el intervalo entre los puntos de quiebre debe superar un cierto valor (MINIX), e imponiendo restricciones a la diferencia mínima entre dos tendencias sucesivas. A continuación, el algoritmo determina la mejor combinación de segmentos continuos minimizando el error cuadrático medio. En el presente trabajo MINIX adoptó valores iguales o superiores a 10.

Finalmente, se aplicó el test de Mann-Kendall (M-K) para evaluar la tendencia y el nivel de significación (α), a las series de PP, ETP y Def (Helsel y Frans, 2006). Para expresar los niveles de significación encontrados se utilizó la siguiente convención: (**), (**), (*) y (+) según sea $\alpha = 0.001, 0.01, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A los efectos de mostrar la influencia de la precipitación y la evapotranspiración potencial sobre la deficiencia de agua en la región en estudio, la Figura 2 presenta la relación entre estas variables para el conjunto de estaciones durante el periodo analizado.

El comportamiento que muestra la Figura 2 revela, haciendo uso de funciones de ajuste exponencial, una relación inversa de carácter no lineal entre PP y Def, tanto en los sectores más húmedos en el este de la región (MJ y LB) como para los ambientes más áridos del oeste (VD). Del mismo modo, la ETP ejerce una influencia exponencial pero positiva sobre Def. Como se observa en la Figura 2, la correlación entre la PP y la Def disminuye a medida que la región se hace más húmeda, siendo el coeficiente de determinación $R^2=0,78$ en la estación VD y $R^2=0,33$ en la estación LB. En esta Figura se observa además que la influencia de la lluvia anual por debajo de 700 mm tiende a producir valores de deficiencia que convergen

y crecen de manera exponencial hasta alcanzar aproximadamente 500 mm. Cuando la precipitación anual resulta mayor a 800 mm, por otra parte, la disminución de la deficiencia registra un cambio muy paulatino. Si bien la dispersión entre los valores de ETP y Def es mayor en general y el rango de variación de ETP menos extendido comparado al de PP, la correlación entre ETP y Def resulta superior en LB y RC respecto a la que muestra la PP. Esto denota que la variación de Def depende de ambos factores climáticos (la PP relacionada a la oferta de agua y la ETP con la demanda atmosférica), y no está unívocamente determinada por los valores de estas variables.

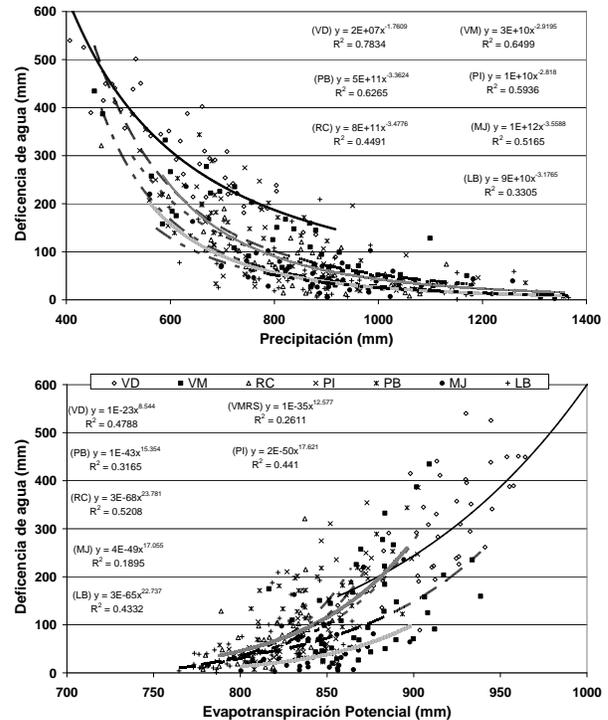


Figura 2. Relación entre los valores anuales de precipitación (arriba) y evapotranspiración potencial (abajo) con la deficiencia de agua en la provincia de Córdoba y las funciones empíricas de ajuste de cada lugar.

El procedimiento de T-M aplicado a ETP produce una secuencia de puntos de quiebre que coincide muy estrechamente con los de PP y Def, pero la alternancia de las pendientes parciales en este caso es concurrente con la de Def, en correspondencia a su relación directa. De esta forma, es digno de destacar que a pesar el carácter independiente de ambas series, PP y ETP acusan una variabilidad de mediano plazo que sigue de manera opuesta la misma recurrencia, de modo que su manifestación conjunta actúa exacerbando la falta de agua o su abundancia.

El análisis de tendencia de las variables PP, ETP y Def para el periodo completo 1970-2012 se resume en la Tabla 2. Mientras PP muestra en VD, RC, PB y LB un comportamiento creciente, las tasas son decrecientes en MJ y PI, pero sin alcanzar significación estadística. VMRS presenta la única tendencia

significativa que corresponde a una tasa decreciente de la lluvia.

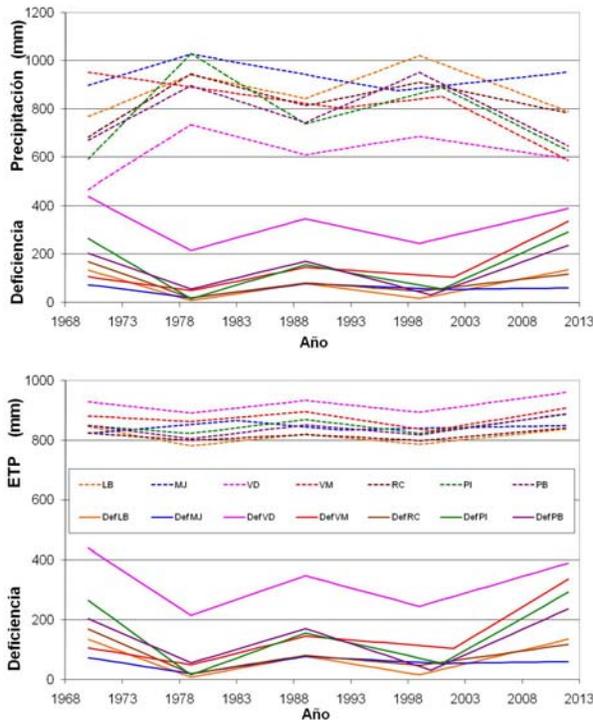


Figura 3. Pendientes parciales y puntos de quiebre determinados a partir del procedimiento de T-M a las series anuales de Precipitación y Deficiencia de agua (arriba) y Evapotranspiración Potencial (ETP) (abajo) para distintas estaciones de Córdoba, Argentina, en el periodo 1970-2012.

En el caso de la ETP, sólo PB y PI presentan tasas positivas de carácter significativa, pero que no alcanzan aparentemente a producir un cambio sobre Def. En cuanto al comportamiento a largo plazo de Def, se observan en general tendencias positivas de carácter no significativas a excepción de VMRS, en correspondencia con la disminución que acusa PP, y una tendencia negativa tampoco significativa en PB. Vemos así que la variación de largo plazo de la condición hidrológica muestra un comportamiento aproximadamente constante si se considera el periodo completo de 43 años, con la excepción de VMRS donde se presenta la única tendencia significativa.

En consecuencia, establecida la ausencia de cambio de largo plazo, el análisis de T-M con MINIX=10 presenta la ventaja de sintetizar el comportamiento de una serie de tiempo de 43 años, a partir de una secuencia de sólo 4 periodos alternados, tanto para PP, ETP y el valor resultante de Def. Este análisis muestra un comportamiento hidrológico relativamente homogéneo en la región que, además, concuerda con una variación de tipo climático global. En efecto, si aplicamos el método de T-M al índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), es decir uno de los indicadores utilizados actualmente para expresar la variabilidad climática (Wang and Schimel,2003), observamos puntos de quiebre en años muy similares a los que se

observan en PP, ETP y Def en la región estudiada. Como se observa en la Figura 4, el PDO muestra, para un período más prolongado que se extiende desde 1925, la ocurrencia de puntos de quiebre muy similares a los que presenta Def en la estación PI, aunque las tendencias en cada período son de signos opuesto

TABLA 2. Test de Mann-Kendall aplicado a las series anuales PP, ETP y Def en el periodo 1970-2012 para estaciones de Córdoba, Argentina, y parámetros de la recta (Q: pendiente; B: ordenada al origen) estimados por el método de Sen

Estación	Serie	Signific.	Q	B
VD	PP		0.470	646.80
	ETP		0.621	905.5
	Def		0.357	291.80
VMRS	PP	**	-6.283	968.23
	ETP		-0.058	869.1
	Def	**	3.760	44.68
RC	PP		0.481	829.11
	ETP		0.341	810.1
	Def		0.403	54.02
PI	PP		-1.909	812.95
	ETP	*	0.650	839.2
	Def		0.806	76.60
PB	PP		0.274	743.53
	ETP	**	1.000	818.4
	Def		-0.082	125.94
MJ	PP		-1.108	932.62
	ETP		0.088	842.1
	Def		0.140	34.22
LB	PP		1.655	841.98
	ETP		0.275	807.0
	Def		0.272	34.89

Además, si comparamos el índice PDO con los valores de PP, ETP y Def correspondientes a cada estación en el periodo de 1970-2012, vemos que todas las variables presentan un comportamiento similar, es decir los puntos de quiebre y las tendencias parciales obtenidas con MINIX=10 concuerdan en casi todas las estaciones. Este comportamiento se ve reflejado claramente en la Tabla 3, que muestra los valores del coeficiente de correlación entre el índice PDO y la PP, ETP y Def para cada lugar. En la tercera columna de la Tabla 3 se muestran los valores de coeficiente de correlación calculados con los valores originales y en la cuarta los obtenidos a partir de las tendencias parciales que produce el método T-M con MINIX=10. En general, los coeficientes de correlación son positivos entre PDO y PP y negativos entre PDO y ETP y entre PDO y Def; vemos también que la correlación entre PDO y Def es mayor en valor absoluto que entre PDO y PP y, además, que los obtenidos con las tendencias

parciales (Tabla 3b) alcanzan mayor significación estadística. Todos estos resultados muestran que la variabilidad climática en la región está mejor representada por la deficiencia de agua que por la cantidad de lluvia caída o la evaporación potencial.

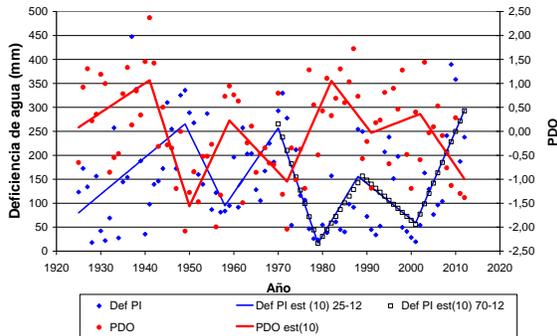


Figura 4. Valores de PDO del período 1925-2012 obtenidos de http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elmino/decadal/pdo_month.html, y deficiencia de agua calculada para la estación PI con los ajustes correspondientes obtenidos con el método de T-M con MINIX=10.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se compara el régimen de lluvia y de ETP en 7 localidades de la provincia de Córdoba con los valores de deficiencia de agua calculados con el modelo de Balance Hídrico Climático (BHC) de Thornthwaite. Los resultados encontrados muestran que existe un comportamiento homogéneo en toda la región para la relación entre PP y Def como entr ETP y Def, producto de la correlación inversa en el primer caso y directa en el segundo.

La tendencia de largo plazo de las variables en general no presenta niveles significativos, a excepción de las estaciones VMRS, que indica una disminución de PP, y en las estaciones PB y PI, donde se produce el aumento de ETP. Sin embargo, sólo la disminución de PP en VMRS estaría explicando el aumento significativo de Def. En cambio, cuando se analizan las tendencias parciales obtenidas con el método de T-M se observa que los valores de Def presentan una mayor homogeneidad en la región y que están más correlacionados con los indicadores de la variabilidad climática como el PDO.

TABLA 3. Coeficientes de correlación entre PDO y los valores anuales de precipitación (PP), Evapotranspiración Potencial (ETP) y Deficiencia (Def) de cada estación en el período 1970-2012. El subíndice (a) corresponde a los valores calculados con los datos originales y el (b) a los valores obtenidos a partir del método de tendencias parciales de Tome-Miranda con MINIX=10.

Estación	Variable	PDO (a)	PDO (b)
VD	PP	0,0651	0,8276
	ETP	0,0552	-0,6491
	Def	-0,0690	-0,8410
VMRS	PP	0,0661	0,3035
	ETP	0,0613	-0,3968
	Def	-0,2185	-0,5532
RC	PP	-0,0367	0,8395
	ETP	0,0099	-0,7587
	Def	-0,1592	-0,9042
PI	PP	0,1957	0,8340
	ETP	-0,0234	-0,4838
	Def	-0,3514	-0,8884
PB	PP	0,1475	0,7414
	ETP	-0,1613	-0,6676
	Def	-0,4628	-0,7325
MJ	PP	-0,0232	0,3078
	ETP	0,2339	0,6251
	Def	-0,1280	-0,3622
LB	PP	0,0125	0,6696
	ETP	-0,1250	-0,8407
	Def	-0,2654	-0,8696

Agradecimientos: Queremos agradecer al Sr. José de Barcelona por su apoyo técnico, al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionar los datos y a la SeCyT-UNC y el CONICET por la ayuda financiera.

Referencias

- de la Casa, A., Nasello, O., 2010. Breakpoints in annual rainfall trends over Córdoba, Argentina. Atmospheric Research 95, 419-427.
- de la Casa, A., Nasello, O., 2012. Low frequency oscillation of rainfall in Córdoba, Argentina, and its relation with solar cycles and cosmic rays. Atmospheric Research 113: 140-146.
- de la Casa, A., Ovando, G., 2005. Modelos periódicos seculares de la deficiencia y el exceso de agua del suelo en una transecta de la región central de Córdoba. XX

- Congreso Nacional del Agua. Conagua2005. Mendoza, del 9 al 13 de Mayo de 2005.
4. de la Casa, A., Ovando, G., 2014. Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195–196:1-11.
 5. Ding, Q., Steig, E.J., Battisti, D.S., Küttel, M., 2011. Winter warming in West Antarctica caused by central tropical Pacific warming. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo1129
 6. Hamon, W.R., 1961. Estimating potential evapotranspiration: *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 87:107-120.
 7. Helsel, D., Frans, L., 2006. Regional Kendall test for trend. *Environmental Science & Technology* 40, 4066-4073
 8. Legates, D.R., McCabe, G.J., 2005. A re-evaluation of the average annual global water balance. *Physical Geography*, 26:467-479.
 9. Lucero, O.A., Rozas, D., 2002. Characteristics of aggregation of daily rainfall in a middle-latitudes region during a climate variability in annual rainfall amount. *Atmospheric Research* 61, 35-48.
 10. McCabe, G.J., Markstrom, S.L., 2007. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p.
 11. McCabe, G.J., Wolock, D.M., 1992. Sensitivity of irrigation demand in a humid-temperate region to hypothetical climatic change. *Water Resources Bulletin*, 28:535-543.
 12. McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., Mescherskaya, A.V., Kruger, A.C., Rehman, S., Dinpashoh, Y., 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 416-417:182-205.
 13. Mintz, Y., Serafini, Y.A., 1992. A global monthly climatology of soil moisture and water balance. *Climate Dynamics*, 8:13-27.
 14. Motha, R.P., Baier, W., 2005. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate regions: North America. *Climatic Change*, 70: 137-164
 15. New, M., Todd, M., Hulme, M., Jones, P., 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.* 21:1899-1922.
 16. Ravelo, A., Irastorza, R.O., Luque, L.E., 2002. Variabilidad de la tendencia en series pluviométricas de la provincia de Córdoba (Argentina). *Rev. Arg. de Agrometeorol.*, 2(1): 69-74.
 17. Rodríguez de Lucero, N., 1977. Estudio de la distribución espacial de las sequías en la República Argentina. Instituto de Meteorología Aplicada, Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires, Argentina. 230 pp.
 18. Schwing, F.B., Jiang, J., Mendelssohn, R., 2003. Coherency of multi-scale abrupt changes between the NAO, NPI, and PDO. *Geophys. Res. Lett.*, 30:1406, doi:10.1029/2002GL016535
 19. Sierra, E.M., Conde Prat, M., Pérez, S., 1995. La migración de cultivos de granos como indicador del cambio climático 1941-93 en la Región Pampeana Argentina. *Rev. Fac. Agr.* 15(2-3):171-176.
 20. Strzepek, K.M., Yates, D.N., 1997. Climate change impacts on the hydrologic resources of Europe—A simplified continental scale analysis. *Climatic Change*, 36:79-92.
 21. Sun, G., McNulty, S.G., Moore Myers, J.A., Cohen, E.C., 2008. Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the Southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association* 44(6):1441-1457.
 22. Tateishi, R., Ahn, C.H., 1996. Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51: 209-215.
 23. Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38:55-94.
 24. Tomé, A.R., Miranda, P.M.A., 2004. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. *Geophys. Res. Lett.* 31, L02207, doi:10.1029/2003GL019100.
 25. Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 26. Vicario, L.V., 2008. Evaluación de las sequías hidrometeorológicas en la cuenca del dique San Roque, Córdoba. Tesis Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Mención en Recursos Hídricos. Instituto Superior de Recursos Hídricos. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina. 190 p.
 27. Viglizzo, E.F., Roberto, Z.E., Filippin, M.C., Pordomingo, A.J., 1995. Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 55:7-16.
 28. Wang, G., Schimel, D., 2003. Climate change, climate modes, and climate impacts. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 28:1-28
 29. Wolock, D.M., McCabe, G.J., 1999. Effects of potential climatic change on annual runoff in the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 35:1341-1350.