

SPATIAL AND TREND ANALYSIS OF PRECIPITATION SEASONALITY IN EASTERN ANDALUSIA REGION (1945-2005)

Ayuso Ruiz, Patricia; García Marín, Amanda Penélope; Taguas Ruiz, Encarnación;
Estevez Gualda, Javier; Ayuso Muñoz, José Luis

Universidad de Córdoba

Spatial variability of seasonality of precipitation in Eastern Andalusia region was analyzed using two indices: i) Walsh Lawler index, and Markham index. These indices quantify the precipitation seasonality using a simple value. This work estimates these indices in a total of 223 rain gauges distributed across this region using monthly precipitation series with more than fifty years (1945-2005 time period). Using GIS techniques maps of this region are presented showing the spatial variability of seasonal and concentration precipitation indices. Time series of these indices were analyzed for trends using non-parametric test based on the Man-Kendall rank.

Keywords: *Precipitation; Precipitation seasonality index; Man-Kendall test*

ANÁLISIS ESPACIAL Y DE TENDENCIAS DE LA ESTACIONALIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN ANDALUCÍA OCCIDENTAL (PERIODO 1945-2005)

Se analiza la variación espacial de la estacionalidad de la precipitación en la región de Andalucía occidental mediante el uso de dos índices de estacionalidad: i) el índice de Walsh y Lawler, y ii) el índice de Markham. Estos índices permiten cuantificar la variabilidad de la precipitación a través del año utilizando una simple cifra. El presente estudio estima estos índices en un total de 223 estaciones distribuidas sobre el territorio de la región con registros de precipitación mensual durante la segunda mitad del siglo XX (1945 a 2005) excediendo más de 50 años. Mediante el uso de SIG se presentan mapas de la región mostrando la variación espacial de los índices de estacionalidad y del periodo de concentración estacional de la precipitación. Las series temporales de estos índices fueron analizadas para detectar tendencias utilizando el test no paramétrico, basado en el rango de Man-Kendal

Palabras clave: *Precipitación; Índice de estacionalidad; Test de Man-Kendall*

1. Introducción

En la actualidad, el estudio de las características de la precipitación es un tema de interés debido, especialmente, a la ocurrencia de condiciones extremas del clima y al posible cambio climático ocasionado por el incremento en la concentración de gases invernadero inducido por las actividades humanas. Observaciones instrumentales en los últimos 157 años demuestran que las temperaturas en la superficie terrestre han aumentado a nivel mundial, con importantes variaciones regionales (IPCC, 2007), intensificando el ciclo hidrológico global (Milly et al., 2002; Huntington, 2006) y alterando los patrones de la precipitación lo que ha propiciado la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos de mayor intensidad, duración y frecuencia (Zhang, Gemmer y Chen, 2008). Alpert et al. (2002) mostraron que en el área mediterránea las lluvias extremas diarias aumentaron durante el periodo 1951-1995, especialmente en España, a pesar de que la lluvia total generalmente disminuía.

La precipitación, el componente más importante del ciclo hidrológico, se caracteriza por su ocurrencia estacional a lo largo del año (variabilidad intra-anual), determinando en gran medida la estacionalidad de otras variables hidrológicas como el caudal y la recarga de los acuíferos. En la Península Ibérica, además del fuerte carácter estacional, la precipitación, presenta una gran variabilidad interanual, que unida a la escasez y elevada variabilidad espacial y temporal determina un grave problema socioeconómico.

El objetivo de este trabajo es estudiar la variabilidad espacial de la estacionalidad de la lluvia en la región de Andalucía occidental, así como analizar las tendencias de las series temporales de los valores de los índices que cuantifican el grado de estacionalidad de la lluvia para detectar si existen tendencias en el grado de estacionalidad de la lluvia en un contexto de cambio climático.

2. Área de estudio y fuente de datos de lluvia

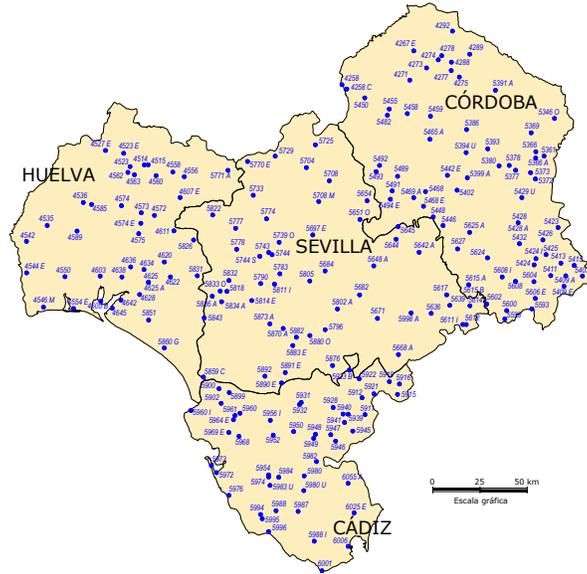
Se circunscribe éste trabajo a la región de Andalucía occidental constituida por las provincias de Córdoba, Sevilla, Huelva y Cádiz abarcando un total de 45374 km² (Figura1). La región se caracteriza por poseer un clima mediterráneo continentalizado en las provincias interiores, mediterráneo típico en cuanto a precipitaciones pero con características de clima continental en cuanto a temperaturas, y clima mediterráneo oceánico con influencias atlánticas en las provincias costeras. En general, la región se caracteriza por poseer inviernos suaves y veranos calurosos. Las precipitaciones se concentran en los meses más fríos, entre octubre y abril, ocasionadas por el flujo de aire húmedo del Atlántico con frentes de lluvia, y escaseando durante el periodo estival.

El estudio se ha basado en las series de datos de precipitación mensual 222 estaciones pluviométricas distribuidas por toda la región (Figura 1). El periodo investigado comprende los años de 1945 a 2005, ambos inclusive y los datos han sido obtenidos de la base de datos MOPREDAS (González-Hidalgo, Brunetti y De Luis, 2011) construida con las series de datos originales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

3. Metodología

Se presentan en esta sección los enfoques metodológicos aplicados en este trabajo, concretamente la metodología de cálculo de los índices de estacionalidad de Walsh y Lowler (1981) y de Markham (1970), además del tests de Mann-Kendall para el análisis de tendencias de series temporales

Figura 1. Localización de las estaciones analizadas



3.1. Índice de Walsh y Lawler de estacionalidad de la precipitación

Este índice establecido por Walsh y Lawler (1981) cuantifica mediante una simple cifra la variabilidad de la precipitación a lo largo del año. Para un año particular, i , el índice de estacionalidad individual SI_i se define como la suma del valor absoluto de las diferencias entre la lluvia mensual de cada mes y la lluvia media mensual del año i dividida por la precipitación anual del año i , es decir

$$SI_i = \frac{1}{R_i} \sum_{n=1}^{n=12} \left| P_{in} - \frac{R_i}{12} \right| \quad (1)$$

donde R_i es la precipitación total anual para el año particular en estudio y P_{in} es la precipitación mensual del mes n . Proporciona información sobre las variaciones interanuales de la estacionalidad. El índice varía desde cero (cuando todos los meses registran la misma cantidad de lluvia) hasta 1,83 (cuando toda la lluvia ocurre en un único mes). Los valores más altos del índice indican una gran desviación de una distribución equitativa de la precipitación a través del año, mientras que los valores cercanos a cero indican que hay poca o ninguna variación estacional en la precipitación. La Tabla 1, muestra los distintos regímenes de precipitación según el valor de éste índice.

Un \overline{SI}_i medio a largo plazo para un lugar, puede calcularse de los índices individuales SI_j sobre un largo periodo, m , de al menos 30 años

$$\overline{SI}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{j=m} SI_j \quad (2)$$

Este índice \overline{SI}_k estima la media de la estacionalidad individual en el periodo de registros disponibles (promedio de los índices SI_j para cada año j), a diferencia del índice \overline{SI} que estima la estacionalidad media en el periodo de registros disponibles y que se define como la suma del valor absoluto de las diferencias entre la precipitación media mensual y la media mensual global dividida por la precipitación media anual (Livada y Asimakopoulou, 2005)

$$\bar{SI} = \frac{1}{\bar{R}} \sum_{n=1}^{12} \left| \bar{P}_n - \frac{\bar{R}}{12} \right| \quad (3)$$

donde \bar{P}_n indica la precipitación media mensual del mes n y \bar{R} la precipitación media anual. Es importante indicar que el índice \bar{SI} está subestimado respecto al índice \bar{SI}_i (Walsh y Lawler, 1981; Livada y Asimakopoulos, 2005).

Tabla 1. Régimen de precipitación según el valor del SI

SI	Régimen de lluvia
< 0,19	Precipitación distribuida a través del año
0,20 -0,39	Precipitación distribuida a través del año pero con una definida estación más húmeda
0,40 -0,59	Algo estacional con una corta estación más seca
0,60 -0,79	Estacional
0,80 -0,99	Marcadamente estacional con un largo periodo seco
1,00 -1,19	La mayor parte de la precipitación en menos de 3 meses
> 1,20	Estacionalidad extrema, con casi toda la precipitación en 1-2 meses

3.2. Índice de Markham de estacionalidad de la precipitación

Este índice propuesto por Markham (1970) utiliza la estadística circular para cuantificar la estacionalidad de la precipitación y la caracteriza en términos del *tiempo medio de ocurrencia* y del *índice de estacionalidad*.

Para cuantificar la estacionalidad de la precipitación, el tiempo a lo largo de un año se representa sobre un círculo medido en el sentido de las agujas del reloj. Los valores de la precipitación media mensual se asumen ser magnitudes vectoriales cuyos módulos representan la magnitud la precipitación media mensual y sus direcciones la del mes del año expresadas por el ángulo

$$\alpha = \frac{360}{365} X \quad (4)$$

donde X es el número de días desde el inicio del año a la mitad del mes correspondiente. El vector resultante de la suma de los doce vectores mensuales constituye una medida de la estacionalidad de la precipitación. La magnitud, P_R , del vector resultante representa el grado de estacionalidad, y su dirección, \varnothing_R , representa el tiempo medio de ocurrencia o periodo de concentración de la estacionalidad. Sus valores se obtienen como

$$\varnothing_{R'} = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right) \quad (5)$$

$$P_R = \sqrt{S^2 + C^2} \quad (6)$$

$$S = \sum_{m=1}^{12} P_m \sin(\varnothing_m) \quad (7)$$

$$C = \sum_{m=1}^{12} P_m \cos(\varnothing_m) \quad (8)$$

donde P_m son las magnitudes de la precipitación mensual y \varnothing_m son los doce ángulos temporales de cada mes. El periodo de concentración de la estacionalidad, \varnothing_R , está dado por el valor de $\varnothing_{R'}$ y los signos de S y C , determinan el cuadrante del ángulo en el que se ubica el vector resultante.

$$\varnothing_R = \varnothing_{R'} \quad \text{si } S > 0 \text{ y } C > 0 \quad (9)$$

$$\varnothing_R = \varnothing_{R'} + 180^\circ \quad \text{si } C < 0 \quad (10)$$

$$\phi_R = \phi_{R'} + 360^\circ \quad \text{si } S < 0 \text{ y } C > 0 \quad (11)$$

Finalmente, se define el índice de estacionalidad SI , como el cociente entre la magnitud del vector resultante P_R y la precipitación media anual. Este cociente varía de 0 (cuando la precipitación es exactamente la misma en todos los meses) a 1 (cuando toda la precipitación ocurre en un único mes). Cuando el valor de SI es pequeño la estacionalidad es baja y la precipitación se distribuye durante todo el año. En zonas de régimen climático mediterráneo en el que la precipitación presenta un máximo en invierno, el índice de estacionalidad SI varía en torno a 0,40-0,5.

3.3. Test de Mann-Kendall para análisis de tendencias en series temporales

Este test, también denominado test tau de Kendall fue propuesto por Man (1945) y Kendall (1975). Es un test no paramétrico basado en el rango que evalúa la significancia de una tendencia, y es ampliamente usado en la detección de tendencias en las series temporales de datos hidroclimáticos (Yue et al., 2002; Kahya y Kalayci, 2004; Oguntunde, Abiodun y Lischeid, 2011; Jung, Bae y Kim, 2011; Shadmani, Madofi y Roknian, 2012; Rougé, Ge y Cai, 2013).

La hipótesis nula H_0 establece que una muestra de datos (x_1, x_2, \dots, x_n) es independiente e idénticamente distribuida, mientras que la hipótesis alternativa H_1 establece que existe una tendencia monótona en x . El test se basa en el estadístico S . Cada par de valores observados $x_i, x_j (i < j)$ de la variable aleatoria es inspeccionada para buscar si $x_i > x_j$ or $x_i < x_j$, definiendo entonces S como (Yu et al., 1993; Douglas, Vogel y Kroll, 2000; Hamed, 2008)

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (12)$$

donde x_i, x_j son los datos secuenciales, n es el número total de datos de la serie temporal, y $\text{sign}(x_j - x_i)$ es 1 para $(x_j - x_i) > 0$; 0 para $(x_j - x_i) = 0$, y -1 para $(x_j - x_i) < 0$. Cuando $n \geq 8$, el estadístico S es aproximadamente normalmente distribuido. Cuando no existen valores repetidos de los datos, la media y la varianza vienen expresadas por

$$E(S) = 0 \quad (13)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (14)$$

Cuando algunos datos de la serie se repiten, la varianza llega a ser

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^m t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (15)$$

donde m es el número de grupos de datos repetidos, cada uno con t_j observaciones repetidas. Para $n > 10$ el estadístico estandarizado del test, Z , es calculado por

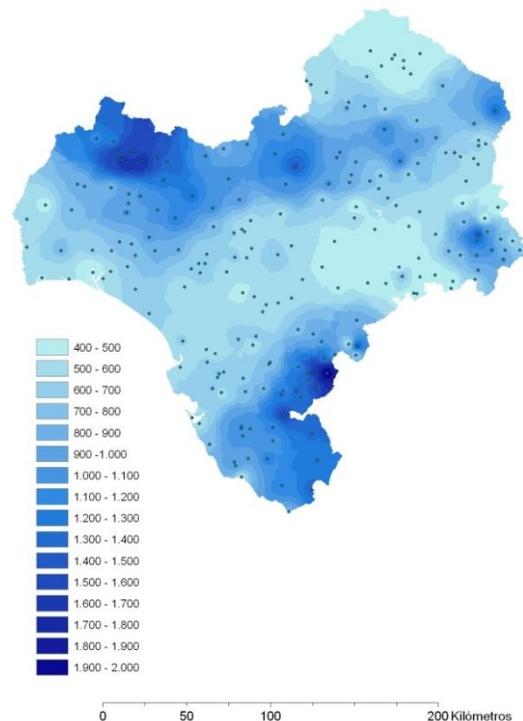
$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Este estadístico, Z , sigue la distribución normal tipificada con media cero y varianza unidad, y se usa para detectar una tendencia significativa. Si $Z > 0$, indica tendencia creciente, y si $Z < 0$, indica tendencia decreciente en la serie temporal analizada. Por consiguiente, la hipótesis nula H_0 es rechazada al nivel de significancia α (la probabilidad de que el test detecte tendencia cuando no la hay) si $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, donde $Z_{1-\alpha/2}$ es el valor crítico de Z según la distribución normal tipificada. Para el nivel de significancia del 5%, el valor de $Z_{1-\alpha/2}$ es 1,9604.

4. Resultados y discusión

Previo al análisis de la estacionalidad de la lluvia en la región se procedió a mapificar con ARC-GIS la precipitación media anual de la región usando la base de datos de lluvia mensual del periodo 1945 a 2005 que se ha dispuesto para este estudio. En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de la precipitación media anual, que varía entre 434 mm y 1953 mm, correspondiendo las zonas más húmedas a la Sierra de Grazalema, Sierra de Aracena y Sierra de Sevilla.

Figura 2. Variabilidad espacial de la precipitación media anual de la región



4.1. Índice de estacionalidad \overline{SI} e índice de estacionalidad medio individual \overline{SI}_i según Walsh y Lowler

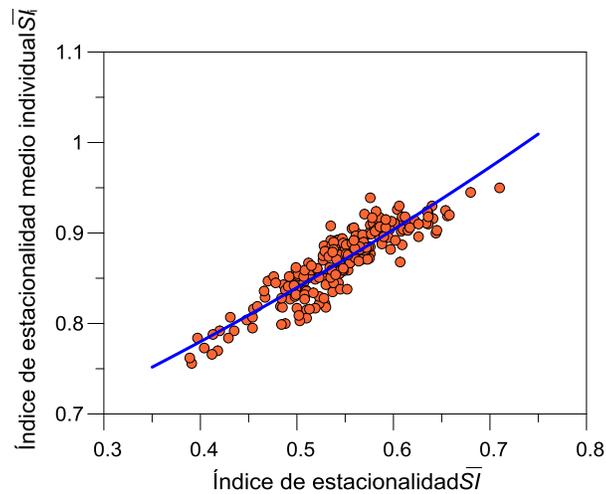
Se han calculado los índices de estacionalidad \overline{SI} de cada una de las 222 estaciones de la región analizadas a partir de los valores de las precipitaciones medias mensuales en cada uno de los observatorios. Los valores del \overline{SI} variaban entre 0,389 (régimen de lluvia algo estacional con una corta estación más seca) en la estación 4274 Villarlalto (Córdoba) y 0,710 (régimen de lluvia estacional) en la estación 6006 Algeciras (Cádiz) con un valor medio en la región de 0,545.

Paralelamente se calcularon los índices de estacionalidad medios individuales \overline{SI}_i , como se indica en la metodología, en todas las estaciones de la región, resultando valores significativamente mayores que los \overline{SI} , en concordancia con los resultados de Walsh y Lawler (1981) y Livada y Asimakopoulos (2005) obtenidos en diversas partes del mundo. Estos valores de \overline{SI}_i variaron entre 0,756 (régimen de lluvia estacional) en la estación 4267E Hinojosa del

Duque (Córdoba) y 0,950 (régimen de lluvia marcadamente estacional con un largo periodo seco) en la estación 6006 Algeciras (Cádiz), siendo el valor medio en la región de 0,869.

Para evaluar el grado de variabilidad en los regímenes de lluvia se examinó el ratio $\overline{SI}/\overline{SI}_i$, denominado *índice de replicabilidad*, que indica si el periodo más húmedo ocurre en un corto periodo de meses o si puede ocurrir en cualquier mes del año. Cuando el valor de este ratio es alto el mes más húmedo del año generalmente ocurre cada año en un mismo periodo de pocos meses, lo que conduce a una alta repetitividad del régimen de lluvia. Por el contrario, valores bajos de este índice indican que el mes más húmedo del año tiende a ocurrir en una amplia variedad de meses, mostrando una relativa falta de fiabilidad en la lluvia y también en su aparición y cantidad. Así pues, áreas con estaciones húmedas y secas muy pronunciadas tenderán a tener los meses más húmedos en años individuales concentrados durante la estación húmeda y por lo tanto poseerán un alto *índice de replicabilidad*.

Figura 3. Correlación entre índices de estacionalidad \overline{SI} y \overline{SI}_i



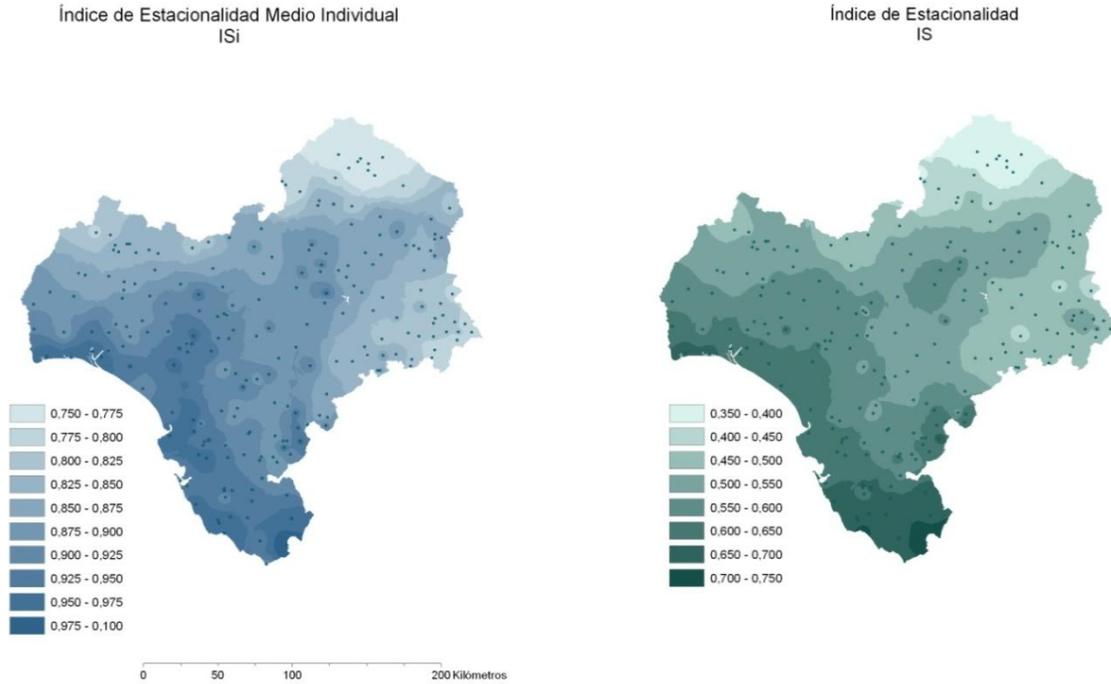
En la región de Andalucía occidental, este índice fluctuó entre 0,506 en la estación 4273 Fuente La Lancha (Córdoba) y 0,747 en la estación 6006 Algeciras (Cádiz), con un valor medio de 0,626, lo que viene a confirmar la estacionalidad de la lluvia con la existencia de definidos periodos húmedos y secos. No se ha observado ninguna correlación entre la lluvia anual y los correspondientes valores de SI_i a escala regional. Esto puede explicarse por el hecho de que los valores de los índices SI_i representan únicamente la variabilidad interanual de la lluvia.

Puesto que el índice de estacionalidad medio individual \overline{SI}_i aporta más información que el índice \overline{SI} , se examinó la relación entre ambos índices, encontrándose una correlación de tipo exponencial (Figura 3) estadísticamente significativa ($R^2 = 0,8023$) expresada por la relación

$$\overline{SI}_i = 0,5809 e^{0,7366 \overline{SI}} \quad (17)$$

La Figura 4 muestra la variabilidad espacial, obtenida con el sistema de información geográfica ARC-GIS, del valor de los índices \overline{SI}_i y \overline{SI} para el periodo de 61 años considerado. Puede observarse como la estacionalidad disminuye de suroeste a nordeste, presentando la más alta estacionalidad la costa atlántica y la menor la zona más interior de la región, el norte de la provincia de Córdoba.

Figura 4. Variación espacial de los índices \overline{SI}_i y \overline{SI} de Walsh-Lawler para el periodo 1945-2005



4.2. Índice de estacionalidad \overline{SI} e índice de estacionalidad medio individual \overline{SI}_i según Markham

Partiendo de los valores de las precipitaciones medias mensuales de las 222 estaciones, se calcularon, para cada estación, los índices de estacionalidad \overline{SI} de Markham, siguiendo la metodología indicada en el apartado 3.2. Los valores del \overline{SI} variaban entre 0,264 (régimen de lluvia algo estacional) de la Estación 4274 Villaralto (Córdoba) y 0,559 (régimen de lluvia estacional) de la estación 6006 Algeciras (Cádiz), con un valor medio en la región de 0,415.

Figura 5. Diagramas vectoriales de la precipitación media mensual en las estaciones 4274 Villaralto (Córdoba) y 6006 Algeciras (Cádiz)

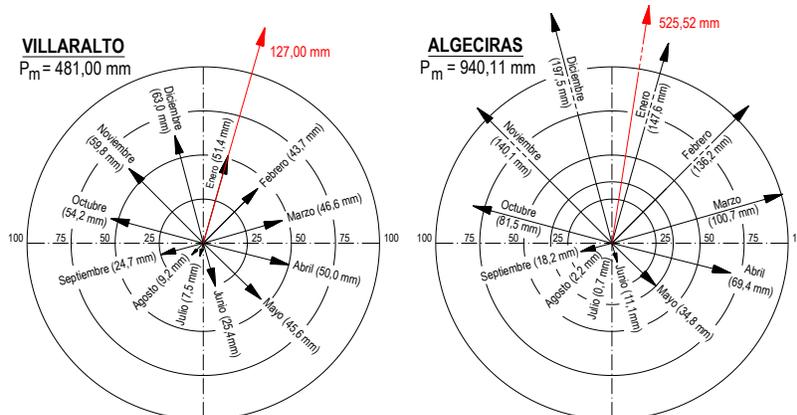
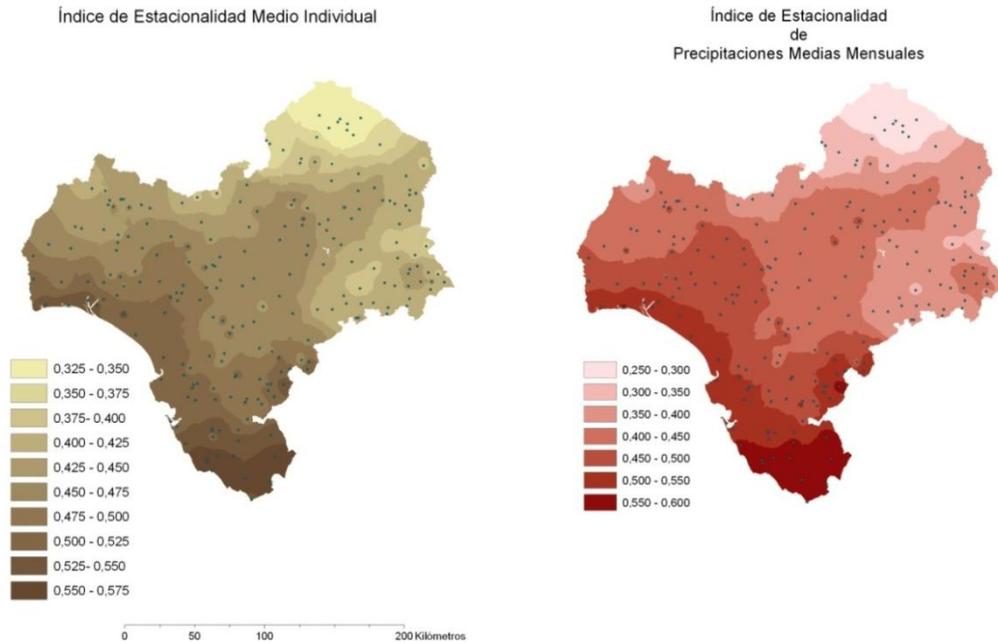


Figura 6. Variación espacial de los índices \overline{SI}_i y \overline{SI} de Markham para el periodo 1945-2005



Análogamente a como se hizo con los índices de Wlsh y Lawler, se calcularon los índices de estacionalidad medios individuales \overline{SI}_i , en todas las estaciones de la región, resultando valores ligeramente mayores que los \overline{SI} . Estos valores de \overline{SI}_i variaron entre 0,341 (régimen de lluvia algo estacional) de la estación 4274 Villaralto (Córdoba) y 0,574 (régimen de lluvia estacional) de la estación de 6006 Algeciras (Cádiz), con un valor medio en la región de 0,456. En la Figura 5 se muestran los diagramas vectoriales de las precipitaciones medias mensuales de estas dos estaciones que presentan los índices \overline{SI} y \overline{SI}_i de Markham más extremos de la región. El cociente entre el módulo del vector y la correspondiente precipitación media anual determina el valor de \overline{SI} .

4.3. Análisis de tendencias de los índices de estacionalidad

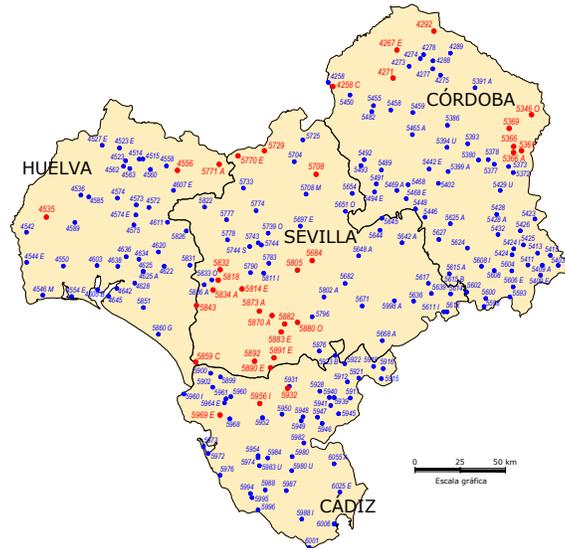
Calculados los índices de estacionalidad anual SI_i de Walsh-Lawler, en el periodo 1945-2005, en cada estación, se procedió a analizar la existencia de tendencias en las series temporales correspondientes mediante el test de Mann-Kendall realizando las pruebas con un nivel de significancia del 5 %, según la metodología expuesta en el apartado 3.3.

Tabla 2. Estaciones con tendencias en el índice de estacionalidad de Walsh-Lawler

Código	Estación Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)	\bar{P}_{anual} (mm)	Índice de Walsh-Lawler		Pendiente tendencia
						$\bar{S}I$	$\bar{S}I_i$	
Provincia de Córdoba								
4258C	Fuente Obejuna	-5,53	38,31	595	568,7	0,435	0,792	0,002959
4267E	Hinojosa del Duque	-5,13	38,50	540	460,0	0,391	0,756	0,001689
4271	Villanueva del Duque	-5,15	38,36	640	568,3	0,448	0,804	0,002523
4292	Santa Eufemia	-4,90	38,60	561	516,3	0,428	0,766	0,002096
5346O	Cardeña Sta, Elena	-4,27	38,19	720	889,9	0,493	0,827	0,002296
5361	Montoro	-4,33	38,01	160	533,5	0,516	0,861	0,002600
5366	Montoro C, de A,	-4,38	38,03	195	549,0	0,511	0,855	0,002177
5366A	Montoro I,N,M,	-4,38	38,00	200	598,2	0,519	0,849	0,002174
5369	Montoro Loma Corral	-4,41	38,12	300	661,6	0,500	0,852	0,002504
Provincia de Sevilla								
5684	Carmona	-5,63	37,44	80	536,1	0,551	0,888	0,002397
5708	Constantina	-5,62	37,87	556	987,0	0,548	0,864	0,001966
5729	Pantano del Pintado	-5,95	37,98	300	705,7	0,492	0,852	0,002797
5770E	Real de la Jara	-6,11	37,95	520	672,3	0,484	0,828	0,002300
5805	El Viso del Alcor	-5,72	37,39	143	607,2	0,533	0,874	0,002554
5814E	Coria del Río	-6,06	37,29	30	532,9	0,576	0,909	0,002071
5818	Benacazón	-6,21	37,33	100	583,1	0,581	0,916	0,002514
5832	Sanlúcar la Mayor	-6,20	37,38	143	595,4	0,570	0,921	0,002139
5834A	Aznalcázar	-6,24	37,28	39	580,6	0,579	0,911	0,002060
5843	Villamanrique	-6,34	37,20	20	533,0	0,586	0,917	0,002154
5859C	Aznalcázar Casilla	-6,34	36,91	4	574,5	0,606	0,909	0,002495
5870A	Los Palacios	-5,87	37,16	10	549,1	0,564	0,894	0,002841
5873A	Los Palacios E,C,A,	-5,95	37,18	5	509,3	0,544	0,876	0,002722
5880O	Utrera Casa Coria	-5,71	37,13	101	554,4	0,523	0,882	0,001860
5882	Utrera El Pinganillo	-5,79	37,12	60	546,3	0,551	0,887	0,002698
5883E	Utrera Las Peñuelas	-5,81	37,08	30	531,3	0,559	0,906	0,003971
5890E	Cabezas de S, Juan	-5,87	36,90	100	529,1	0,537	0,879	0,001805
5891E	Cabezas de S, Juan	-5,85	36,95	105	596,0	0,551	0,877	0,002126
5892	Lebrija	-5,97	36,93	20	596,8	0,561	0,894	0,002264
Provincia de Huelva								
4535	Puebla de Guzmán	-7,30	37,61	184	506,1	0,560	0,876	0,002294
4556	Aracena Valdezufre	-6,49	37,87	611	926,3	0,530	0,843	0,001901
5771A	Sta, Olalla Cala	-6,23	37,91	515	742,5	0,508	0,827	0,001943
Provincia de Cádiz								
5932	Pantano de Bornos	-5,76	36,80	130	623,0	0,565	0,885	0,002294
5956I	Arcos de la Frontera	-5,93	36,72	80	587,2	0,577	0,899	0,001901
5969E	Jerez Azucarera	-6,13	36,66	20	615,1	0,609	0,918	0,001943

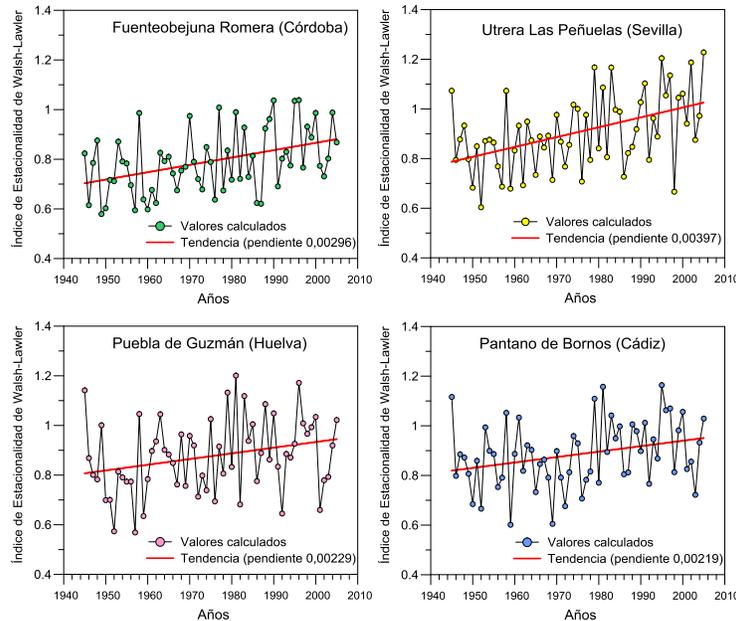
En 32 de las 222 estaciones analizadas se rechazó la hipótesis nula H_0 , de no existencia de tendencia monótonica de la serie temporal de valores anuales del SI_i . En la Tabla 2 se muestran las estaciones en las que se han detectado tendencias, junto con los atributos geográficos, precipitación media anual, valores medios de los índices $\bar{S}I$ y $\bar{S}I_i$, y pendiente de la tendencia. En todas ellas, las tendencias tienen pendiente positiva (los datos siguen una tendencia creciente), lo que significa que la estacionalidad tiende a aumentar, por lo que la lluvia tiende a concentrarse en menos tiempo.

Figura 7. Localización de las estaciones con tendencia en la estacionalidad de la lluvia



En la Figura 7 se muestra la localización geográfica de estas estaciones, y en la Figura 8 se muestran las series temporales del índice de estacionalidad anual S_i de cuatro de estas estaciones.

Figura 8. Tendencias del índice de estacionalidad medio individual S_{li} de Walsh-Lawler



De la misma manera, calculados los índices de estacionalidad anual de Markham, en el mismo periodo 1945-2005, se procedió a analizar las tendencias de las series temporales correspondientes mediante el test de Mann-Kendall. Solo en una estación se detectó tendencia estadísticamente significativa, negativa en éste caso, correspondiendo a la estación 4544E San Silvestre-Guzmán (Huelva), indicando que el índice de estacionalidad tiende a disminuir, En la

Tabla 3 se indican los atributos geográficos y los valores de los índices de estacionalidad de dicha estación.

Tabla 3. Estaciones con tendencias en el índice de estacionalidad de Markham

Código	Estación Nombre	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m)	\bar{P}_{anual} (mm)	Índice de Markham		Pendiente tendencia
						$\bar{S}I$	$\bar{S}I_i$	
Provincia de Cádiz								
4544E	S,Silvestre-Guzmán	-7,41	37,38	90	570,3	0,446	0,494	-0,001743

5. Conclusiones

Se han analizado las características espaciales y temporales de la estacionalidad de la precipitación mensual en 222 estaciones pluviométricas a escala regional en el área de Andalucía occidental durante el periodo 1945 a 2005. La estacionalidad de la lluvia se ha caracterizado mediante dos índices: a) el índice propuesto por Walsh y Lawler (1981), y b) el índice propuesto por Markham (1970). Ambos índices se han evaluado doblemente: a) en cada estación individualmente año a año para estudiar su evolución temporal y existencia de tendencias, y b) con los valores de la precipitación media mensual del periodo analizado.

El valor medio del índice de estacionalidad individual $\bar{S}I_i$ de Walsh-Lawler resultó significativamente mayor que el obtenido con los valores de la precipitación media mensual $\bar{S}I$. Entre los dos índices existe una correlación exponencial estadísticamente significativa, lo que permite estimar de forma precisa el índice $\bar{S}I_i$, en lugares de la región donde solo se dispongan de datos de precipitación media mensual, ya que el uso del $\bar{S}I_i$, realiza evaluaciones de la estacionalidad más realistas. Este índice varió espacialmente entre 0,756 (régimen de lluvia estacional) y 0,950 (régimen de lluvia marcadamente estacional con un largo periodo seco) con un valor medio en la región de 0,869. La estimación de las series temporales de valores $S I_i$, además de describir la variabilidad interanual de la lluvia, permitieron analizar la existencia de tendencias estadísticamente significativas en las mismas, habiéndose detectado tendencias positivas de este índice en 32 estaciones de la región, con lo que puede concluirse que ha habido cambios en los regímenes de lluvia observados, al menos en estas estaciones, en el periodo 1945-2005, siendo la tendencia a aumentar la estacionalidad de la precipitación, es decir a concentrar la lluvia en periodos húmedos más cortos.

El valor medio del índice de estacionalidad individual $\bar{S}I_i$ de Markham también resultó ligeramente superior que el $\bar{S}I$, El valor a escala regional $\bar{S}I_i$ varió entre 0,341 (régimen de lluvia algo estacional) y 0,574 (régimen de lluvia estacional), con un valor medio en la región de 0,456.

Los dos índices de estacionalidad analizados (Walsh-Lawler y Markham) y en las dos variantes estudiadas han mostrado la existencia de un gradiente decreciente del índice de estacionalidad de la precipitación que va de suroeste a noreste, encontrándose la mayor estacionalidad de la lluvia en la costa Atlántica de la región.

6. Referencias

Alpert P., T, Ben-Gai, A, Baharad, Y, Benjamini D, Yekutieli, M, Colacino, L, Diodato, C, Ramis, V, Homar, y R, Romero, S, Michaelides, and A, Manes, 2002, The paradoxical increase

- of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values, *Geophysical Research Letters*, 29(10), DOI: 10.1029/2001GL013554.
- IPCC, 2007, Climate Change 2007: The Physical Science Basis, In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L, (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p, 996.
- Douglas, E.M.; R.M, Vogel y C.N, Kroll, 2000, Trends in floods in low flows in the United States: impact of spatial correlation, *Journal of Hydrology*, 240: 90-105.
- González-Hidalgo J.C., M, Brunetti y M, de Luis, 2011, A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitation trends December 1945-November 2005), *International Journal of Climatology*, 31:715-731.
- Hamed K.H., 2008, Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis, *Journal of Hydrology*, 349: 350– 363.
- Huntington T.G, 2006, Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis, *Journal of Hydrology* 319: 83–95.
- Jung I-W, D-H Bae y G Kim, 2011, Recent trends of mean and extreme precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, 31: 359–370.
- Kahya E, y S, Kalayci, 2004, Trend analysis of streamflow in Turkey, *Journal of Hydrology*, 289 : 128–144.
- Kendall, M, G, 1975, Rank Correlation Methods, Ed, Charles Griffin, London.
- Livada I, y D, N, Asimakopoulos, 2005, Individual seasonality index of rainfall regimes in Greece, *Climate Research*, 28: 155–161
- Mann, H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*,13, 245-259.
- Markham C.G., 1970, Seasonality of precipitation in the united states, *Annals of the Association of American Geographers*, 60(3): 593-597.
- Milly, P.C.D., Wetherald, R.T., Dunne, y K.A., Delworth, T.L., 2002, Increasing risk of great floods in a changing climate, *Nature* 415: 514–517,
- Oguntunde P.G., Abiodun B.J, y Lischeid G., 2011, Rainfall trends in Nigeria, 1901–2000, *Journal of Hydrology* 411: 207–218.
- Rougé C, Y Ge and X Cai, 2013, Detecting gradual abrupt changes in hydrological records, *Advances in Water Resources*, 53: 33-44.
- Shadmani M., S, Marofi y M, Roknian, 2012, Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran, *Water Resource Manage.*, 26:211–224.
- Walsh P.D, y D.M, Lawler, 1981, Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time, *Weather* 36: 201–208.
- Yue, S.; P, Pilon; B, Phinney y G, Cavadias, 2002, The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series, *Hydrological Processes*, 16: 1807-1829.
- Zhang Q, M, Gemmer, J, Chen, 2008, Climate changes and flood/drought risk in the Yangtze Delta, China, during the past millennium, *Quaternary International*, 17: 62-69.